

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**LABORATORNÍ MODEL
MAGNETOHYDRODYNAMICKÉHO GENERÁTORU**

MAGNETOHYDRODYNAMIC GENERATOR LABORATORY MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Hanžl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Ondřej Hanžl

ID: 173651

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní model magnetohydrodynamického generátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Studium problematiky magnetohydrodynamických generátorů
2. Sestrojení a vyzkoušení malé laboratorní smyčky MHD
3. Měření konkrétních veličin a zhodnocení dosažených výsledků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou magnetohydrodynamických (MHD) generátorů, konkrétně je v rámci práce zkonstruován funkční model MHD generátoru. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části práce je rozebrána problematika magnetohydrodynamické přeměny a MHD generátorů obecně. V experimentální části je popsán samotný model využívající vodné roztoky chemických sloučenin jako pracovní látku a neodymové magnety k vytvoření magnetického pole. Model byl úspěšně otestován a bylo změřeno generované napětí a proud.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetohydrodynamický generátor, MHD, elektricky vodivé kapaliny, magnetické pole

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the issue of magnetohydrodynamic (MHD) power generation, in particular a laboratory model of MHD generator is constructed. The thesis is divided into a theoretical and an experimental part. The theoretical part deals with the principle of MHD power generation and with MHD generators generally. In the experimental part the model itself is described. It uses common aqueous solutions as a working fluid and four neodym magnets to create a magnetic field. The model was successfully tested and generated voltage and current were measured.

KEYWORDS

magnetohydrodynamic generator, MHD, electrically conducting fluids, magnetic field,

HANŽL, Ondřej. *Laboratorní model magnetohydrodynamického generátoru*. Brno, 2017, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Laboratorní model magnetohydrodynamického generátoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod	10
1 Teoretická část studentské práce	11
1.1 MHD generátor	11
1.1.1 Magnetohydrodynamický pohon	12
1.2 Teoretický popis jevů v magnetohydrodynamickém generátoru	13
1.2.1 Hallovo napětí	13
1.2.2 Elektrické pole v kanálu generátoru	14
1.2.3 Elektrický proud v generátoru	15
1.2.4 Základní zapojení magnetohydrodynamických generátorů . . .	18
1.2.5 Generátor s otevřeným cyklem	20
1.2.6 Generátor s uzavřeným cyklem	21
1.3 Problematika výběru pracovní látky	21
2 Experimentální část	24
2.1 Návrh a realizace modelu	24
2.1.1 Potrubí	24
2.1.2 Čerpadlo	24
2.1.3 Průtokoměr	25
2.1.4 Kanál generátoru	26
2.1.5 Tlakové ztráty	28
2.1.6 Magnetický obvod	29
2.2 Použité pracovní látky	32
2.3 Měření parametrů magnetohydrodynamického generátoru	33
2.3.1 Laboratorní podmínky	33
2.3.2 Měřicí přístroje	33
2.3.3 Korekce měřeného průtoku	34
2.3.4 Napětí naprázdno	35
2.3.5 Voltampérová charakteristika generátoru	39
2.4 Návrhy na optimalizaci magnetohydrodynamického generátoru	49
2.4.1 Konstrukce	49
2.4.2 Elektrochemické jevy	49
2.4.3 Optimalizace měření	49
3 Závěr	50
Literatura	52

Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
Seznam příloh	57
A Grafické zpracování měření	58
A.1 Měření s uhličitanem draselným	58
A.2 Měření s chloridem sodným	61
A.3 Měření s modrou skalicí	64
A.4 Měření s hydroxidem draselným	65
A.5 Porovnání měřených roztoků	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	MHD generátor	11
1.2	Yamato 1	12
1.3	Hallův jev	14
1.4	Složky rychlosti v kartézské soustavě souřadnic	16
1.5	Zapojení elektrod MHD generátorů	18
1.6	Diskový generátor	20
1.7	Rozkladné napětí	23
2.1	Blokové schéma MHD generátoru	24
2.2	Celkový pohled na MHD generátor	25
2.3	Průtokoměr při měření roztoku skalice modré	25
2.4	Kanál generátoru	27
2.5	Neodymový magnet	30
2.6	Magnetický obvod	31
2.7	Simulace v programu FEMM	31
2.8	Závislost napětí naprázdno generátoru na průtoku	38
2.9	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C+B+M	41
2.10	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, Q_{max}	43
2.11	VA charakteristika, NaCl, C+B+M, porovnání koncentrací	45
2.12	VA charakteristika, HCl, 10 %, C+B+M	48
2.13	VA charakteristika, porovnání roztoků, C+B+M, Q_{max}	48
A.1	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C+M	58
A.2	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C	59
A.3	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, M	59
A.4	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, B	60
A.5	VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, Q_{min}	60
A.6	VA charakteristika, NaCl, 20 %, C+B+M	61
A.7	VA charakteristika, NaCl, 10 %, C+B+M	62
A.8	VA charakteristika, NaCl, 5 %, C+B+M	62
A.9	VA charakteristika, NaCl, C+B+M, Q_{min} , porovnání	63
A.10	VA charakteristika, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 17,5 %, C+B+M,	64
A.11	VA charakteristika, KOH, 18 %, C+B+M,	65
A.12	VA charakteristika, porovnání roztoků, C+B+M, Q_{min}	66

SEZNAM TABULEK

2.1	Parametry použitých magnetů	30
2.2	Parametry teslametrů	32
2.3	Použité roztoky	33
2.4	Měřicí přístroje	34
2.5	Absolutní chyba měřicích přístrojů	35
2.6	Korekční součinitel pro měření průtoku	35
2.7	Teoretické napětí naprázdno	37
2.8	Měřené napětí naprázdno	37
2.9	K ₂ CO ₃ , 25 %, základní parametry	40
2.10	K ₂ CO ₃ , 25 %, VA charakteristiky	42
2.11	NaCl, základní parametry	44
2.12	NaCl, VA charakteristiky	45
2.13	KOH, HCl, CuSO ₄ · 5H ₂ O, základní parametry	46
2.14	KOH, HCl, CuSO ₄ · 5 H ₂ O, VA charakteristiky	47

ÚVOD

Magnetohydrodynamické (MHD) generátory jsou zařízení sloužící k výrobě elektrické energie poměrně netradiční cestou. Využívají průchodu elektricky vodivé látky magnetickým polem. Tento jev zkoumal již Michael Faraday a v roce 1832 se jej pokusil pozorovat. Provedl experiment, při kterém se snažil změřit elektrický proud generovaný tokem slané vody řeky Temže v Londýně v magnetickém poli Země [1]. Jeho experiment nebyl úspěšný a i dlouhá léta po něm se nedařilo sestrojít fungující experimentální zařízení. Zlom nastal až v 50. letech 20. století, díky rozvoji fyziky plazmatu a vývoji materiálů pro extrémní teploty. V mnoha zemích následně započal intenzivní výzkum s velkým optimismem. Vzhledem k náročným technologickým problémům byl ale během několika let výrazně utlumen a s vývojem pokračovaly pouze Spojené státy a Sovětský svaz. V 70. letech došlo k obnovení zájmu o provoz MHD generátorů ve více zemích, přesto se ale nepodařilo překonat veškeré problémy a nikdy nedošlo k jejich velkému komerčnímu využití [4, 9]. V menší míře pokračuje výzkum až do dnešní doby, s využitím nových materiálů a technologií. Myšlenkou budoucnosti je využití MHD generátoru jako zdroje elektrické energie na výstupu z fúzního reaktoru. Další možnou variantou je stavba generátorů využívajících pohybu mořských vod.

Předmětem této práce je sestrojení malého funkčního laboratorního modelu MHD generátoru, v kterém je vodivá látka tvořená roztokem anorganických sloučenin a magnetické pole vytvořeno pomocí neodymových magnetů. Jedná se o velmi netradiční zařízení, které je v tuzemsku dle dostupných zdrojů v podstatě unikátní. Podobný pokus provedli studenti Bednář a Šleis (viz [2]) v rámci fyzikálního semináře na FJFI na ČVUT v Praze s nepříliš přesvědčivými výsledky. Více záznamů o dalších experimentech podobného rázu dohledat nelze. V anglické literatuře již je možné dohledat záznamů více. Úspěšný experiment popisuje Takeda a kol. ve své práci (viz [3]). Jedná se o model ve výrazně větším měřítku, s magnetickým polem generovaným supravodivými cívkami, v kterém je testována mořská voda.

Teoretická část práce se věnuje především popisu fyzikálních zákonitostí v MHD generátorech a jejich základním typům a rozdělení. Experimentální část práce následně popisuje problematiku návrhu a konstrukci samotného modelu. Dále je zde popsáno měření parametrů generátoru a vyhodnocení naměřených výsledků.

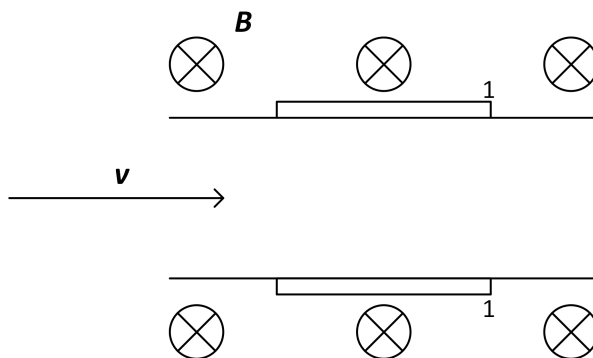
Model MHD generátoru bude dále sloužit jako demonstrační pomůcka v laboratoři při výuce.

1 TEORETICKÁ ČÁST STUDENTSKÉ PRÁCE

1.1 MHD generátor

Magnetohydrodynamický generátor je zařízení, které generuje elektrickou energii průchodem vodivé tekutiny magnetickým polem. Pracovní látkou v MHD generátoru může být jakákoliv proudící, vodivá látka, typicky je jí ionizovaný plyn, tekutý kov nebo vodivá kapalina, tak jako v případě konstruovaného modelu. Princip přeměny energie se příliš neliší od tradičního točivého generátoru, v kterém je elektrická energie získána z pohybu vodiče magnetickým polem. V MHD generátoru je vodičem sama pracovní látka a v souladu s Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce dochází k indukci elektrického napětí. Na rozdíl od klasického generátoru s parní turbínou je tedy přeměna energie přímá s absencí jakýchkoliv točivých částí. Odolnost točivých částí limituje parametry parních turbín a generátorů, mj. maximální pracovní teplotu. Magnetohydrodynamický generátor může teoreticky pracovat při výrazně vyšší teplotě, což je důležité z hlediska účinnosti. Jako u každého tepelného stroje je účinnost MHD generátoru limitována, dle účinnosti Carnotova cyklu, poměrem teplot mezi kterými tepelný stroj pracuje. Čím větší je rozmezí teplot, tím větší je teoreticky dosažitelná účinnost [9].

Základní konstrukci magnetohydrodynamického generátoru můžeme vidět na obrázku 1.1. Pracovní látka proudí určitou rychlostí \mathbf{v} kanálem generátoru, v jehož příčném směru působí magnetické pole \mathbf{B} . Na stěnách kanálu jsou umístěny elektrody, z kterých je odebírána elektrická energie. Podrobnější popis fyzikálních dějů probíhajících v kanálu generátoru následuje v nadcházejících kapitolách.



Obr. 1.1: MHD generátor, 1 - elektrody

1.1.1 Magneto hydrodynamický pohon

Magneto hydrodynamického jevu lze využít nejenom jako zdroj elektrické energie, ale taktéž jako spotřebič elektrické energie, který koná mechanickou práci. Principiální schéma je téměř stejné jako u MHD generátoru, jediným zásadním rozdílem je, že na elektrody je přiváděno napětí z externího zdroje. Elektricky vodivá pracovní látka je unášena silou působící na volné nosiče náboje. Provedení MHD pohonu může být, mimo konstrukce s elektrodami s průchodem stejnosměrného proudu a neměnným magnetickým polem, také s proměnným magnetickým polem, u kterého nedochází k žádnému kontaktu pracovní látky a čerpadla [5, 6].

Velkou oblastí využití magneto hydrodynamických pohonů je čerpání tekutých kovů, které je za použití klasických čerpadel komplikované. Použití MHD čerpadla je v praxi častou využívanou alternativou. Konkrétní aplikace můžeme vidět v čerpání tekutého sodíku v jaderné energetice v rychlých množinových reaktorech nebo také v kovozpracujícím průmyslu k dávkování přesného množství roztavených kovů nebo jako třídičky sloužící k separaci hlušiny od kovové rudy [5].

Zajímavé je také použití jakožto lodního pohonu, kdy je pracovní látkou samotná mořská slaná voda. Elektromagnetická síla vytváří proud mořské vody, který na základně principu akce a reakce působí na loď v opačném směru, čímž ji pohání. Výhodou je velmi tichý chod, což vybízí k využití pro armádní účely. K většímu rozšíření tohoto pohonu ale nedošlo, první a pravděpodobně nejznámější loď využívající magneto hydrodynamického pohonu je YAMATO 1 (viz Obr. 1.2), která měla posloužit hlavně jako ověření funkčnosti pohonu. Pohon je proveden s elektrodami napájenými stejnosměrným proudem, magnetické pole je vytvořeno supravodivou cívkou. Tento magneto hydrodynamický pohon vytváří tah asi 16 kN při dodávaném elektrickém výkonu 3600 kW. Maximální rychlost byla asi 15 km/h. Následně bylo vytvořeno několik dalších experimentálních modelů, které ale nepřinesly výrazné zlepšení parametrů [7].



Obr. 1.2: Yamato 1 [8]

1.2 Teoretický popis jevů v magnetohydrodynamickém generátoru

V následující kapitole jsou popsány základní fyzikální jevy a vztahy popisující děje v magnetohydrodynamickém generátoru. Při popisu je uvažována elementární konstrukce, tak jak je uvedena na obrázku 1.1, s ionizovaným plynem jakožto pracovní látkou. Situace při použití kapaliny s rozpuštěnou chemickou látkou je velmi podobná, pouze vznik volných nabitých částic je odlišný (viz kapitola 1.3).

1.2.1 Hallovo napětí

Síla, která působí na pohybující se nabitě částice v magnetickém poli, tedy i na volné částice s nábojem (elektrony a ionty) v ionizovaném plynu v MHD generátoru, se nazývá Lorentzova síla \mathbf{F} (N) a platí pro ni:

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.1)$$

Kde Q (C) je náboj částice, \mathbf{v} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je rychlost částice a \mathbf{B} (T) je působící magnetické pole, přičemž součin $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ odpovídá indukované intenzitě elektrického pole. Lorentzova síla působí na částici v každém okamžiku kolmo na směr rychlosti, výsledkem je tedy kruhová trajektorie částice. Přitom na těleso pohybující se po kruhové dráze působí dostředivá síla F_{do} , jejíž velikost musí být rovna Lorentzově síle, platí tedy rovnost:

$$F_{do} = F \quad (1.2)$$

Dostředivou sílu působící na částici, lze určit jako:

$$F_{do} = m \frac{v^2}{r} \quad (1.3)$$

Kde m (kg) je hmotnost částice, v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) rychlost částice a r (m) poloměr kružnice, po které obíhá. Z rovnosti obou sil lze poloměr vyjádřit, platí [10]:

$$r = \frac{mv}{QB} \quad (1.4)$$

Vidíme, že poloměr kružnice je přímo úměrný hmotnosti částice. Jelikož je hmotnost iontů řádově větší než hmotnost elektronů, můžeme pro zjednodušení jejich zakřivení zanedbat a tvrdit, že magnetickým polem v kanálu nebudou ovlivněny. Pohyb elektronů v pracovní látce je silně ovlivněn srážkami s neutrálními částicemi. Četnost srážek je možné vyjádřit při zavedení střední volné dráhy elektronu λ (m), která udává průměrnou vzdálenost, kterou urazí elektron mezi dvěma srážkami. Dále je nutné zavést střední dobu mezi srážkami τ (s), která udává průměrný čas mezi dvěma srážkami. Podíl těchto dvou veličin udává rychlost elektronu, která je zároveň

rovna obvodové rychlosti po kružnici $v_o = \omega r$, kde ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) je úhlová rychlost. Porovnáním obou rychlostí můžeme vyjádřit parametr β (-), pro který platí [10]:

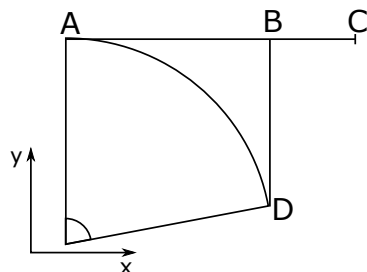
$$\beta = \omega\tau = \frac{\lambda}{r} \quad (1.5)$$

β se nazývá Hallův činitel, tento činitel ovlivňuje velikost Hallova napětí. Jedná se o parametr závisející na vlastnostech pracovní látky. Vznik Hallova napětí lze popsat pomocí obrázku 1.3. Elektron se mezi dvěma srážkami (křivka A-D) pohybuje po kružnici. Během pohybu urazí určitou vzdálenost ve směru osy y (úsečka B-D), která je kolmá na směr pohybu pracovní látky. V tomto směru tedy vzniká potenciál. Elektron se zároveň zbrzdil o určitou hodnotu ve směru osy x (úsečka B-C) vůči neutrálním částicím, na které magnetické pole nepůsobí (respektive vůči iontům, jejichž zakřivení je minimální). Ve směru proudění pracovní látky tedy také vzniká potenciál. Je označován jako Hallův jev, případně Hallovo napětí a je úměrný činiteli β [10].

1.2.2 Elektrické pole v kanálu generátoru

Výsledná intenzita elektrického pole \mathbf{E}^* ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) působící na nabitě částice mezi elektrodami v MHD generátoru se skládá ze dvou složek. První složkou je intenzita elektrického pole indukovaného působením magnetického pole, kterou lze určit jako vektorový součin rychlosti proudění pracovní látky \mathbf{v} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a magnetické indukce \mathbf{B} (T). Tato intenzita vychyluje elektrony k anodě a ionty ke katodě, z tohoto důvodu vzniká u elektrod prostorový náboj, jenž vytváří elektrické pole o intenzitě \mathbf{E} , které působí proti pohybu částic. Tuto intenzitu elektrického pole (resp. napětí) lze měřit mezi elektrodami. Výsledná intenzita působící na částice je tedy vektorovým součtem obou popsaných intenzit, lze tedy napsat [4]:

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.6)$$



Obr. 1.3: Hallův jev

Tuto rovnici můžeme zapsat skalárně, směr osy y je zároveň kolmý na magnetické pole i směr proudění.

$$E_y^* = vB - E_y \quad (1.7)$$

Velikost těchto veličin výrazně závisí na zatížení MHD generátoru. Ve stavu na-prázdko, kdy není připojena žádná zátěž, dochází ke shromažďování nabitých částic na elektrodách do té doby, než elektrické pole vyvolané tímto prostorovým nábojem kompletně vykompenzuje indukované elektrické pole. Platí tedy $E_y^* = 0$. Pokud je připojena zátěž, začne obvodem protékat elektrický proud, čímž se sníží velikost prostorového náboje. Pokud jsou elektrody zkratovány, prochází generátorem maximální proud. Prostorové náboje v okolí elektrod zaniknou ($E_y = 0$), intenzita elektrického pole působící na částice odpovídá intenzitě indukovaného elektrického pole ($E_y^* = vB$) [4].

S těmito jevy souvisí důležitý parametr generátoru, činitel zatížení K (-), který je definován jako [11]:

$$K = \frac{E_y}{vB} \quad (1.8)$$

E_y je intenzita mezi elektrodami a vB je velikost indukované elektrické intenzity. Činitel zatížení lze také zapsat jako poměr napětí při daném zatížení ku napětí na prázdko [4].

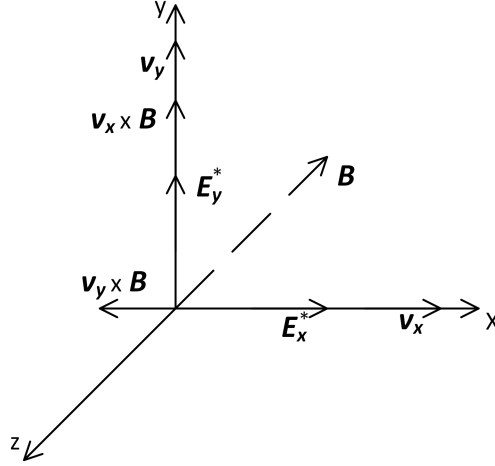
1.2.3 Elektrický proud v generátoru

Pro odvození velikosti elektrického proudu v kanálu MHD generátoru je nejdříve nutné zjistit střední rychlost elektronů, které proud tvoří. Ta se rovná součinu pohyblivosti elektronů a intenzity elektrického pole, v našem případě \mathbf{E}^* z předchozí kapitoly (viz kapitola 1.2.2), tedy:

$$\mathbf{v} = -\mu \mathbf{E}^* \quad (1.9)$$

Přičemž μ ($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) je pohyblivost elektronů, \mathbf{E}^* ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$) je intenzita elektrického pole a záporné znaménko vyjadřuje směr pohybu elektronů, který je opačný, než je směr intenzity elektrického pole. Intenzita elektrického pole působící na elektron byla popsána v předchozí kapitole. Po dosazení ze vztahu 1.6 dostaneme vztah pro střední rychlost [10]:

$$\mathbf{v} = -\mu(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.10)$$



Obr. 1.4: Složky rychlosti v kartézské soustavě souřadnic

Z této vektorové rovnice určíme rychlosti pro směr v ose x a y pomocí rozkreslení situace na jednotlivé složky v kartézské soustavě souřadnic (viz Obr. 1.4). Následně dostáváme vztahy:

$$v_x = -\mu(E_x^* - v_y B) \quad (1.11)$$

$$v_y = -\mu(E_y^* + v_x B) \quad (1.12)$$

Ze vztahů vidíme, že střední rychlost elektronů ve směru osy x závisí na střední rychlosti ve směru osy y a naopak. Jedná se o dvojici rovnic o dvou neznámých, které lze vyřešit. Při využití parametru β , který je zaveden v kapitole 1.2.1 a pro který zároveň platí $\beta = B\mu$, dostaneme pro střední rychlost elektronů ve směru osy x a y vztahy [10]:

$$v_x = \frac{-\mu}{1 + \beta^2}(E_x^* + \beta E_y^*) \quad (1.13)$$

$$v_y = \frac{-\mu}{1 + \beta^2}(E_y^* - \beta E_x^*) \quad (1.14)$$

Nyní již je možné vyjádřit vztah pro elektrický proud, respektive proudovou hustotu \mathbf{J} ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$), v kanálu magnetohydrodynamického generátoru. Proudovou hustotu lze vyjádřit z obecného Ohmova zákona jako:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.15)$$

Kde σ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$) je konduktivita pracovní látky a \mathbf{E} ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) intenzita elektrického pole. Tuto intenzitu lze vyjádřit jako podíl střední rychlosti elektronu a jeho pohyblivosti. Po dosazení výše odvozených vztahů pro střední rychlosti dostáváme výsledné vztahy pro proudovou hustotu v kanálu generátoru ve směru osy x i y [4]:

$$J_x = \frac{\sigma}{1 + \beta^2}(E_x^* + \beta E_y^*) \quad (1.16)$$

$$J_y = \frac{\sigma}{1 + \beta^2}(E_y^* - \beta E_x^*) \quad (1.17)$$

Vidíme, že proudová hustota ve směru osy x závisí na intenzitě elektrického pole v ose x i y a naopak. Je nutné podotknout, že uvedené rovnice nerespektují složky proudu tvořené ionty. Rovnice je možné použít přibližně do velikosti Hallova činitele pro $\beta < 7$. Při větší hodnotě je nutno brát v potaz i ionty, jakožto částice tvořící proud [4].

Elektrický výkon v magnetohydrodynamickém generátoru vztažený na jednotku objemu p_e ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) lze obecně určit jako:

$$p_e = \mathbf{J}\mathbf{E} = J_y E_y + J_x E_x \quad (1.18)$$

V popisovaném generátoru s celistvými elektrodami je intenzita elektrického pole ve směru proudění (E_x) nulová, elektroda představuje zkrat v tomto směru. Užitečný elektrický výkon je tedy součin proudové hustoty a intenzity elektrického pole ve směru osy y , tedy:

$$p_e = J_y E_y \quad (1.19)$$

Pro velikost intenzity elektrického pole E_y ze vztahu 1.8 platí [4]:

$$E_y = K v B \quad (1.20)$$

Vztah (viz 1.21) pro proudovou hustotu J_y upravíme dosazením ze vztahu (viz 1.7) pro E_y^* a dosazením za E_y z předchozího vztahu, čímž dostaneme [4]:

$$J_y = \frac{1}{1 + \beta^2}(1 - K)\sigma v B \quad (1.21)$$

Těmito úpravami jsme získali vztahy, které obsahují pouze relativně snadno určitelné veličiny dané parametry MHD generátoru. Po dosazení dostáváme výsledný vztah pro měrný výkon [4]:

$$p_e = \frac{1}{1 + \beta^2} K(1 - K)\sigma v^2 B^2 \quad (1.22)$$

Měrný příkon p_m (W/m^3) dodávaný pracovní látkou odpovídá výkonu, kterým je pracovní látka brzděna díky působení magnetického pole, skládá se z výše uvedeného

elektrického výkonu a neužitečného výkonu, který pracovní látku ohřívá formou Joulova tepla. Ten lze stanovit jako [4]:

$$p_m = J_y v B \quad (1.23)$$

Po dosazení proudové hustoty J_y ze vztahu 1.21 dostáváme:

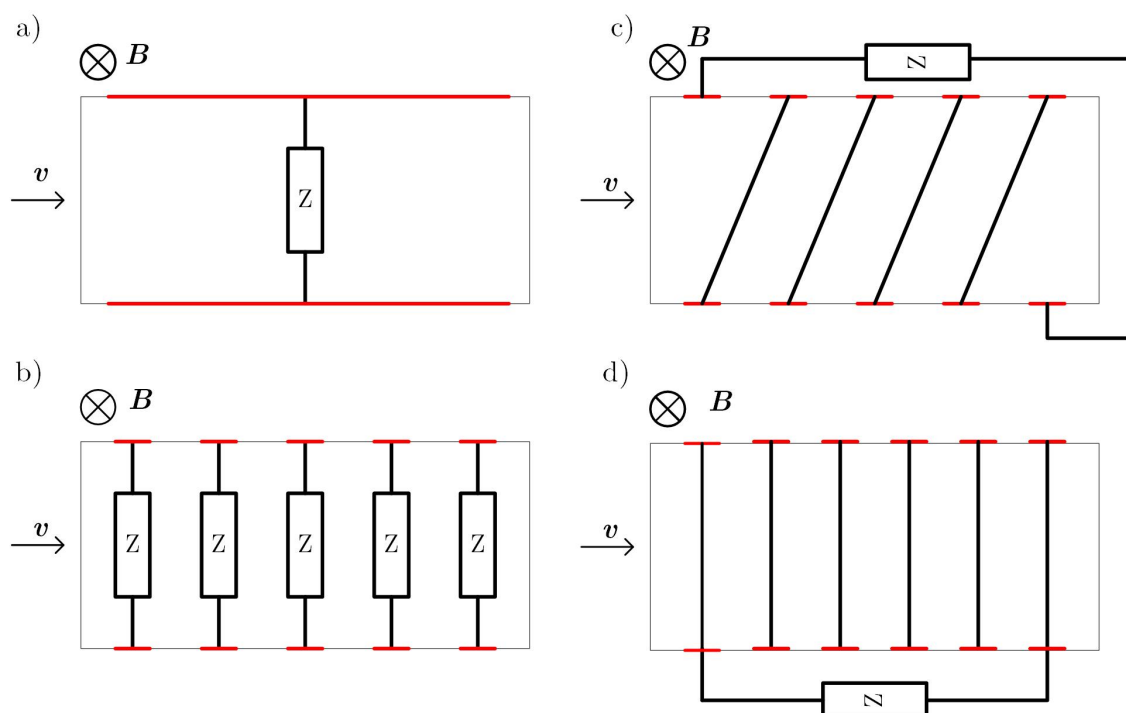
$$p_m = \frac{1}{1 + \beta^2} (1 - K) \sigma v^2 B^2 \quad (1.24)$$

Elektrická účinnost generátoru je následně dána podílem výkonu a příkonu tedy:

$$\eta_e = \frac{p_e}{p_m} = K \quad (1.25)$$

Jedná se pouze o elektrickou účinnost, nikoliv celkovou účinnost generátoru, která je ovlivněna dalšími faktory (odvod tepla přes stěny kanálu aj.).

1.2.4 Základní zapojení magnetohydrodynamických generátorů



Obr. 1.5: Druhy zapojení elektrod MHD generátorů, červená barva – elektrody, Z – zátěž, a) generátor se spojitými elektrodami, b) generátor Faradayova typu, c) generátor Hallova typu, d) generátor Montardého typu

Generátor se spojitými elektrodami

Jedná se o elementární konstrukci MHD generátoru (viz obrázek 1.5 a), pro který platí všechny výše uvedené vztahy. Elektrody, celistvé po celé délce kanálu, představují zkrat ve směru proudění pracovní látky ($E_x = 0$). Proudění, které v tomto směru vznikají, představují ztráty a generátor pracuje velmi neefektivně již při činiteli $\beta = 1$ [4]. Vzhledem k jednoduchosti konstrukce se jedná o typ, který bude v rámci práce realizován.

Generátor Faradayova typu

Generátor Faradayova typu (viz Obr. 1.5 b) zabráňuje průchodu Hallových proudů, které limitující generátor se spojitými elektrodami, jejich rozdělením na části, které jsou vzájemně izolované. Nevýhodou tohoto generátoru je nutnost připojit samostatnou zátěž na každý pár elektrod, přičemž eliminace Hallových proudů je tím účinnější, čím jemnější je dělení elektrod [4].

Generátor Hallova typu

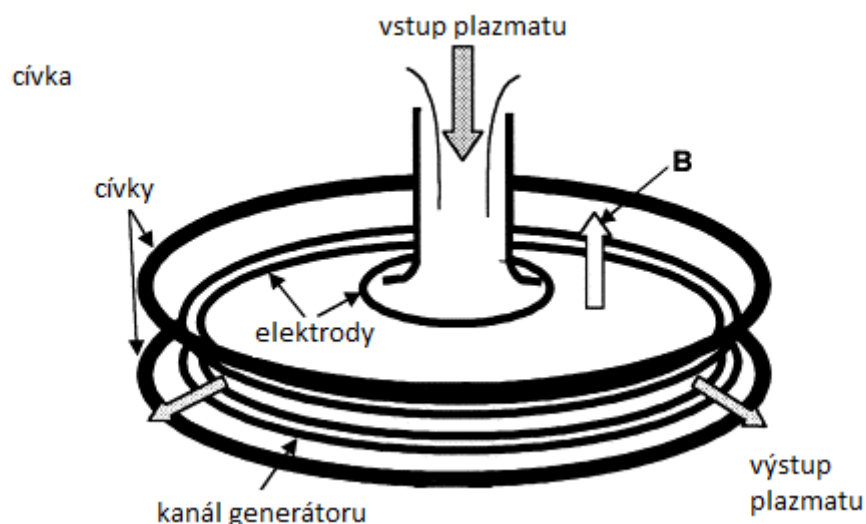
Generátor Hallova typu (viz Obr. 1.5 c) využívá opačnou myšlenku než Faradayův generátor. Jeho snahou je maximalizovat Hallovo napětí, jež je využito jako pracovní. Elektrody jsou taktéž podélně rozdělené, ale každý pár je vzájemně zkratován. Elektrický výkon je následně odebírán z krajních elektrod. Výhodou je tedy pouze jeden zatěžovací obvod, na druhou stranu je nutné zajistit velký činitel β , aby byl dosažený výkon srovnatelný s Faradayovým generátorem [4].

Generátor Montardyho typu

Kombinací obou předchozích zapojení dostaneme MHD generátor Montardyho typu (viz Obr. 1.5 d). Elektrody jsou děleny podobně jako u Faradyova typu, přičemž každá elektroda je zkratována s následující protilehlou elektrodou diagonálně. Tímto zajistíme konstantní poměr elektrických polí $E_x/E_y = \alpha$. Při splnění podmínky $\alpha = 1/\beta$ dostaneme optimální elektrické parametry [4].

Diskový generátor

Diskový generátor (viz Obr. 1.6) je tvořen dvěma kruhovými stěnami. Středem jedné stěny proudí pracovní látka do generátoru a opouští jej po celém obvodu. Elektrody jsou prstencové a tvoří dvě dvojice - vnější a vnitřní na obou stěnách, magnetické pole je kolmé na stěny a má stejný směr jako vstupující pracovní látka. Stejně jako u Hallova typu generátoru je jako pracovní využíváno Hallovo napětí. Tento typ generátoru pracuje nejefektivněji a vykazuje nejvyšší měrný výkon [4, 12].



Obr. 1.6: Diskový generátor, převzato z [12] a upraveno

1.2.5 Generátor s otevřeným cyklem

V generátorech s otevřeným cyklem bývají pracovní látkou horké plyny, které vznikají spalováním fosilních paliv. Teplota takovýchto spalin se pohybuje mezi 2000 až 3000 K. Ionizace plynů při těchto teplotách není dostatečná a je nutno dodat přísady, které zvyšují vodivost. Těmito přísadami jsou nejčastěji alkalické kovy. Nejvhodnějším materiálem je cesium, které má nejnižší ionizační energii, vzhledem k lepší dostupnosti je ale častěji využíván draslík. Přidáním 1 % draslíku se zvýší vodivost plynu až tisíckrát. Generátor je tvořen spalovací komorou, ve které se spaluje palivo, čímž se uvolňuje teplo a horký plyn je následně vháněn do kanálu MHD generátoru. Teplota plynu na výstupu z kanálu je stále velmi vysoká, je tedy možné jej využít jako zdroj tepla pro klasickou tepelnou elektrárnu s Rankin-Clausiovým cyklem. Tímto dojde k výraznému zvýšení účinnosti celého procesu [9].

Na tento typ generátorů byl v minulosti výzkum nejvíce zaměřen. K velkému komerčnímu použití ale nakonec nedošlo. Velkým problémem je hledání materiálů odolných při tak vysokých teplotách, které v kanálu figurují. Je nutné najít takto extrémně odolné materiály pro stěny kanálu i elektrody. Nejvyšší dosažená účinnost postaveného generátoru při trvalém provozu nepřesáhla 11 %. O něco málo větší účinnost bylo dosaženo v generátorech při generování krátkodobých výkonových pulsů. Největším navrhovaným projektem měla být elektrárna U-500 využívající zemní plyn v Sovětském svazu. Celková projektovaná účinnost byla 53 % v kombinaci s parním cyklem a celkový elektrický výkon 582 MW. K jejímu uvedení do provozu ale nakonec nedošlo [12].

1.2.6 Generátor s uzavřeným cyklem

Generátory s uzavřeným cyklem sestávají ze zdroje tepla, které je předáváno pracovní látce pomocí tepelného výměníku. Cirkulaci pracovní látky zajišťuje kompresor, podobně jako v generátorech s otevřeným cyklem je nevyužité teplo na výstupu z generátoru využito v cyklu s parní turbínou. Pracovní látkou je typicky inertní plyn nebo tekutý kov.

Generátor s inertním plynem

Používanými plyny bývají argon nebo hélium. Použití inertních plynů přináší řadu technologických výhod. Vzhledem k chemické netečnosti těchto plynů nejsou materiály vystavovány tak agresivnímu prostředí, což výrazně usnadňuje stavbu generátoru. Díky netermické ionizaci je možné pracovat s plyny o nižší teplotě (do 2000 K), což taktéž zmenšuje namáhání materiálů. Netermická (nerovnovážná) ionizace popisuje plazma, v kterém není dosaženo termodynamické rovnováhy mezi různými částicemi plynu. Teplota elektronů může být výrazně vyšší než teplota neutrálních molekul a iontů. Elektrony tedy při srážkách s neutrálními částicemi předávají větší energii než v plazmatu s termodynamickou rovnováhou, čímž dochází k většímu stupni ionizace. Další výhodou je možnost plného znovuvyužití ionizační příměsi, což ekonomicky umožňuje využití césia [4, 11]. V Japonsku byly otestovány generátory, jejichž účinnost dosahovala až 30 % při výkonu asi 1 MW, přičemž se jednalo pouze o výkonové pulsy. Účinnost u zařízení pro trvalý provoz ale nepřesahuje 16 % [13].

Generátor s tekutým kovem

V těchto MHD generátorech je pracovní látkou kov v tekuté fázi. Hlavní výhodou je velmi vysoká konduktivita v porovnání s plyny používanými v generátoru při nižších teplotách. Podobně jako u generátorů s inertním plynem tedy nejsou tak velké požadavky na teplotní odolnost konstrukčních materiálů. Podobně jako u ostatních typů generátorů vývoj nedosáhl takové úrovně, kdy bylo možné velké komerční využití [4].

1.3 Problematika výběru pracovní látky

Jednou ze zásadních částí konstruovaného magnetohydrodynamického generátoru je výběr vhodné pracovní látky. Základní vlastnosti, které musí splňovat vzhledem k charakteru generátoru, jsou kapalný stav a co největší elektrická vodivost při pokojové teplotě. Tyto podmínky omezují výběr téměř výhradně na vodné roztoky

dostupných chemických sloučenin, především soli, případně hydroxidy a kyseliny. Vedení elektrického proudu v kapalinách má určitá specifika a úskalí, je tedy nutné se touto problematikou zabývat.

Vedení elektrického proudu v kapalinách

Za normálního stavu většina kapalin není dobrým vodičem elektrického proudu. K vedení proudu je nutná přítomnost volných vodivých částic, v kovech se jedná o volné elektrony. Vodivost kapalin lze dramaticky zvýšit přidáním látky, která se v kapalině rozštěpí na volné ionty. Toto rozštěpení se nazývá elektrická disociace. Rozpouštědlem s největšími disociačními účinky je chemicky čistá voda. Pro vedení elektrického proudu je nutné přivést elektrické pole, toho snadno docílíme pomocí elektrod, na které přivedeme napětí. Elektrické pole vyvolá sílu působící na ionty, čímž dojde k jejich usměrněnému pohybu směrem k elektrodám. Anionty se pohybují směrem k anodě, kationty ke katodě. Z tohoto jednoduchého popisu je vidět zásadní rozdíl mezi elektronovou vodivostí v kovech a iontovou vodivostí v kapalinách – při iontové vodivosti dochází k přesunu látky. Ionty, které dosáhnou elektrod, se zde vylučují nebo reagují s materiálem elektrody, čímž dojde k jejich neutralizaci. Celý tento proces se nazývá elektrolýza a je popsán Faradayovými zákony elektrolýzy [17].

Elektrický odpor elektrolytu

Elektrický odpor elektrolytu R (Ω), lze vyjádřit podobně jako u kovů, platí tedy:

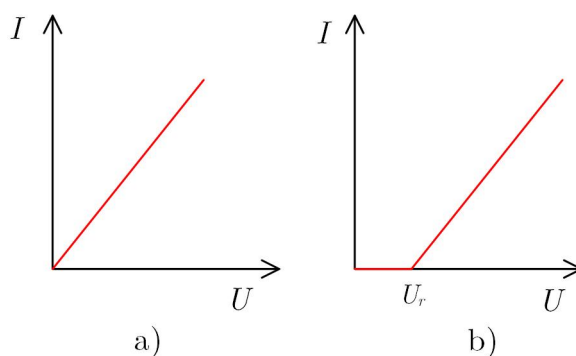
$$R = \rho_R \frac{l}{S} \quad (1.26)$$

Kde ρ_R (Ω m) je měrná rezistivita elektrolytu, S (m^2) je ponořená plocha elektrod a l (m) je vzdálenost elektrod. U elektrolytů je často používána převrácená hodnota měrné rezistivity - měrná konduktivita γ (S/m). Vodivost elektrolytu závisí především na rozpuštěné látce, její koncentraci a na teplotě elektrolytu.

Vznik elektrické dvojvrstvy

Při ponoření elektrody do elektrolytu může dojít k reakci, při které se část iontů vyloučí z elektrody a na rozhraní elektrody a elektrolytu vzniká elektrický potenciál. Může nastat také opačná situace, kdy se kladné ionty z elektrolytu připojí do struktury elektrody a vzniká elektrický potenciál s opačným směrem působení. Tento jev se nazývá elektrická dvojvrstva a elektrody označujeme jako polarizované. Velikost a směr vzniklého potenciálu závisí na chemickém složení elektrod a elektrolytu. V případě, kdy je na obou elektrodách stejná elektrická dvojvrstva, je

na obou rozhraních stejný elektrický potenciál s opačným znaménkem a při přiložení napětí je procházející proud přímo úměrný napětí, tak jako na obrázku 1.7 a). Příkladem této kombinace jsou měděné elektrody v roztoku CuSO_4 . V případě, kdy elektrické dvojvrstvy nejsou stejné, můžeme na elektrodách naměřit elektrické napětí odpovídající rozdílu vzniklých potenciálů, které se nazývá rozkladné. Voltampérová charakteristika následně odpovídá obrázku 1.7 b). Aby procházel proud je nejprve nutné překonat rozkladné napětí [16]. Jak je popsáno v experimentální části práce, tyto jevy výrazně ovlivňovaly měření parametrů generátoru. Vzhledem k rozsahu a zaměření této práce není prostor věnovat se této problematice podrobněji. Detailní popis těchto elektrochemických jevů je možné dohledat v literatuře, např.: [27].

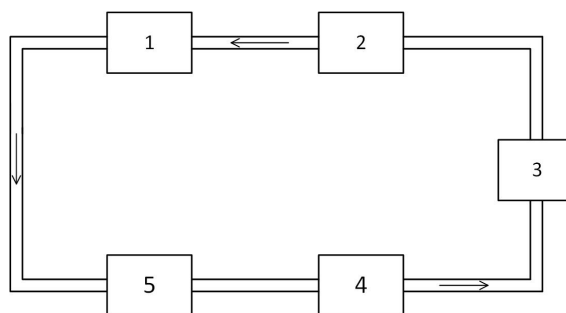


Obr. 1.7: Rozkladné napětí

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Návrh a realizace modelu

Model magnetohydrodynamického generátoru je provozován v laboratoři nekonvenčních přeměn na Ústavu elektroenergetiky FEKT VUT v Brně. Jedná se o cirkulační smyčku tvořenou trubkami z PVC s průtokovým čerpadlem. Samotný MHD generátor je tvořen kanálem s uhlíkovými elektrodami umístěnými v magnetickém poli, které je vytvořeno permanentními magnety. Základní blokové schéma můžeme vidět na obrázku 2.1. Výsledné reálné provedení je zobrazeno na obrázku 2.2. Generátor byl navržen na základě permanentních magnetů a průtokového čerpadla, což jsou prvky, které byly předem k dispozici. Dále byla snaha navrhnout generátor s optimálními parametry a s možností měnit a optimalizovat jednotlivé součásti bez nutnosti velkého zásahu do samotné konstrukce.



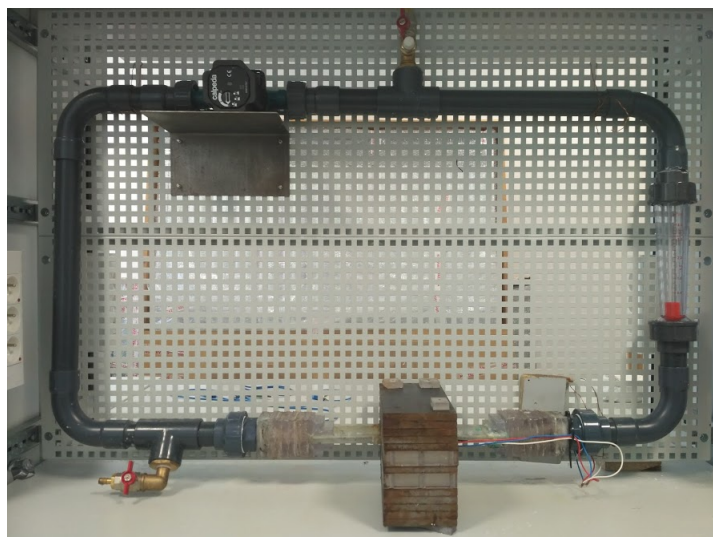
Obr. 2.1: Blokové schéma MHD , 1 – čerpadlo, 2 – odvzdušňovací ventil, 3 – průtokoměr, 4 – kanál MHD generátoru, 5 – napouštěcí a vypouštěcí ventil

2.1.1 Potrubí

Jednotlivé prvky tvořící celý systém magnetohydrodynamického generátoru jsou spojeny pomocí PVC trubek o vnitřním průměru 36 mm. Nejdůležitější prvky, tedy čerpadlo, kanál MHD generátoru a průtokoměr, jsou připojeny pomocí převlečených matic, čímž je umožněna jejich snadná demontáž a následná možnost úpravy, optimalizace či výměny. Soustava je napuštěna pracovní látkou přes kulový ventil ve spodní části. Podobný ventil je připojen v horní části, který slouží k odvzdušnění celé soustavy.

2.1.2 Čerpadlo

V modelu je použito průtokové čerpadlo Calpeda NCE EI. Jedná se o čerpadlo se synchronním motorem s permanentním magnetem s regulovatelným výkonem.



Obr. 2.2: Celkový pohled na MHD generátor

Maximální výkon je 53 W, maximální průtok $3,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a maximální dovolený pracovní tlak 6 bar. Podrobné technické údaje lze zjistit v technickém listu dodávaném výrobcem (viz [14]).

2.1.3 Průtokoměr

Měření průtoku proudící kapaliny slouží k určení rychlosti proudění v samotném kanálu MHD generátoru. Měření je provedeno plovákovým průtokoměrem LZS-32 od společnosti Thermis (viz Obr. 2.3). Měřicí rozsah průtokoměru je $0,4\text{--}4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Uváděná třída přesnosti (TP) je 4 %.



Obr. 2.3: Průtokoměr při měření roztoku skalice modré

Korekce pro odlišné roztoky

Výchylka plovákových průtokoměrů je závislá na hustotě proudící kapaliny. Použitý průtokoměr je kalibrován pro měření průtoku vody, pro měření jiných kapalin je tedy nutné provést korekci. Pro poměr měřených průtoků kapalin různých hustot platí vztah [20] :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{(\rho_T - \rho_1)\rho_2}{(\rho_T - \rho_2)\rho_1}} \quad (2.1)$$

Kde Q_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) je změřený průtok kapaliny, pro kterou provádíme korekci, Q_2 je její skutečný průtok, ρ_T ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota tělíska a ρ_1 je hustota vody a ρ_2 je hustota měřené kapaliny.

Hustotu tělíska je nutné zjistit pomocí hmotnosti a objemu, jelikož se jedná o kovové závaží zalité plastem a výrobce tuto hodnotu neuvádí. Hmotnost m_T byla zvažena pomocí rovnoramenných vah a objem V_T byl změřen pomocí vytlačeného množství vody při ponoření do odměrného válce. Naměřené hodnoty jsou: $m_T = 39$ g; $V_T = 12,5$ ml. Hustotu následně určíme pomocí známého vztahu:

$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T} \quad (2.2)$$

$$\rho_T = \frac{39 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{12,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 3120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Zhodnocení průtokoměru

Plovákový průtokoměr se při návrhu generátoru jevil jako velmi příznivý z několika důvodů. Předně se jedná o celkovou jednoduchost spočívající v možnosti snadné a rychlé montáže a demontáže a možnosti okamžitého odečtení průtoku. Dalším je vizuální kontrola kapaliny, která se ukázala jako velmi vhodná při odvzdušňování systému. Při měření s rozličnými chemickými roztoky je zásadní chemická odolnost tohoto průtokoměru a v neposlední řadě je také cenově dostupný. Na druhou stranu tento průtokoměr přináší i určité nevýhody. Na vstupu je výrazné zúžení, které společně s tělískem vytváří přídavnou tlakovou ztrátu. Dalším problémem je samotná přesnost měření ($TP = 4 \%$), přičemž tělísko místy nereaguje na jemné změny průtoku, pravděpodobně kvůli tření o vodící tyč. Toto se projevilo především u měření průtoku koncentrovaných roztoků s vysokou hustotou.

2.1.4 Kanál generátoru

Kanál magnetohydrodynamického generátoru je nejdůležitější částí celého systému, jeho rozměry určují zásadní parametry generátoru. Průřez kanálu přímo ovlivňuje

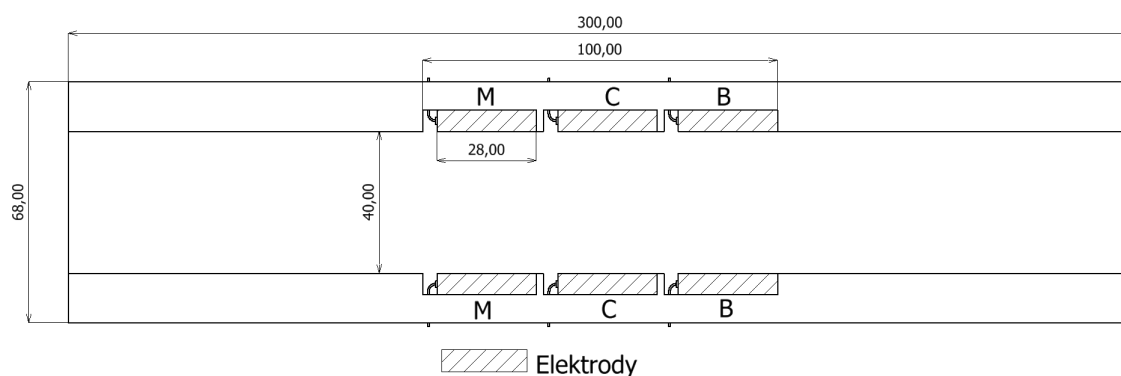
rychlost proudění pracovní látky, přičemž jeho šířka je přímo úměrná indukovanému napětí v generátoru a jeho výška představuje délku vzduchové mezery v magnetickém obvodu, čímž ovlivňuje velikost magnetické indukce. Zároveň je objem mezi elektrodami přímo úměrný celkovému výkonu. Dalším parametrem, který ovlivňuje rozměry, jsou tlakové ztráty, které zpětně limitují rychlost proudění kapaliny. Stanovení ideálních parametrů je tedy velmi komplexní záležitost. V případě popisovaného modelu byly zmíněné parametry vybrány z velké části podle reálných možností konstrukce v laboratoři a dostupnosti jednotlivých komponent.

Elektrody

V MHD generátoru jsou použity uhlíkové elektrody, jejich výhodou je malá chemická reaktivita s použitými roztoky a snadná dostupnost. Elektrody mají výšku 6 mm, čímž je ve výsledku určena i výška kanálu generátoru. Na každé stěně jsou umístěny tři vzájemně izolované elektrody o délce 28 mm. Tímto jsou vytvořeny tři dvojice elektrod, jejichž různé zapojení bylo otestováno. Elektrody v sobě mají zalisovaný měděný vodič, který je vyveden vně kanálu. Každá dvojice je pro přehlednost označena písmeny M, C a B podle barvy připojených kabelů.

Konstrukce

Kanál je sestaven z čirých polykarbonátových desek, které jsou spojovány lepením. Veškeré důležité rozměry (v mm) můžeme vidět na obrázku 2.4. Šířka i aktivní délka kanálu je dána konstrukcí magnetického obvodu. Okrajové části kanálu slouží k ustálení proudění pracovní látky v blízkosti zúžení a rozšíření kanálu z kruhového průřezu. Zúžení i rozšíření je taktéž vyrobeno z polykarbonátových destiček, do kterých byl vyfrézován potřebný profil a následně byly slepeny.



Obr. 2.4: Kanál generátoru

2.1.5 Tlakové ztráty

Tlakové ztráty vznikají při proudění kapaliny jejím třením o stěnu potrubí, při čemž kapalina ztrácí část své kinetické energie. Tyto tlakové ztráty se vyjadřují ve výšce vodního sloupce určeného hydrostatickým tlakem, platí tedy [23]:

$$\Delta p = \Delta h \rho g \quad (2.3)$$

Kde Δp (Pa) jsou tlakové ztráty, Δh (m) odpovídající výška vodního sloupce, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) hustota kapaliny a g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) tíhové zrychlení.

Laminární a turbulentní proudění

Z hlediska tlakových ztrát je dále nutné rozlišit laminární a turbulentní proudění. Při laminárním proudění nedochází k promíchávání kapaliny ve směru kolmém k proudění. Kapaliny vytváří rovnoběžné proudnice, které se vzájemně téměř neovlivňují. Rychlost proudění se zvyšuje od minimální rychlosti u stěn potrubí k maximální ve středu potrubí. Na druhou stranu u turbulentního proudění dochází ke křížení proudnic a k víření kapaliny. Profil rychlosti je odlišný od laminárního proudění. Nárůst rychlosti směrem ke středu potrubí je výrazně menší. Parametrem rozhodujícím o charakteru proudění je Reynoldsovo číslo Re (-). Při proudění kruhovým průřezem pro něj platí [21]:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2.4)$$

Kde v (m/s) je rychlost proudění, d (m) je průměr potrubí a ν ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) je kinematická viskozita kapaliny. Proudění je laminární v případě, kdy je Reynoldsovo číslo menší než 2320, turbulentní proudění nastává od hodnoty Reynoldsova čísla 6000, v rozmezí mezi těmito hodnotami je přechodová oblast mezi prouděním laminárním a turbulentním [21].

Výpočet tlakových ztrát

Pro výpočet tlakových ztrát v trubce kruhové průřezu platí následující vztahy [22]:

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.5)$$

Kde ζ (-) je ztrátový součinitel, ρ hustota kapaliny a v rychlost proudění. Pro ztrátový součinitel ζ dále platí:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d} \quad (2.6)$$

Kde λ (-) je součinitel tření, l (m) délka potrubí a d (m) průřez potrubí. Výpočet součinitele tření λ je dále nutné odlišit pro laminární a turbulentní proudění. Pro laminární proudění platí:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.7)$$

Pro turbulentní proudění je výpočet složitější. Součinitel tření je funkcí Reynoldsova čísla a drsnosti potrubí a je určován experimentálně nebo z empirických vztahů.

Tlakové ztráty v nekruhovém potrubí

Výpočet tlakových ztrát v potrubí jiného průřezu než kruhového je principiálně stejný, pouze je nutné určit ekvivalentní průměr d_{ekv} , který lze určit jako [22]:

$$d_{ekv} = \frac{4S}{o} \quad (2.8)$$

kde S (m²) je obsah průřezu potrubí a o (m) obvod průřezu potrubí.

Tlakové ztráty v modelu generátoru

Tlakové ztráty v modelu generátoru byly stanoveny pomocí jednoduchého experimentu. K napouštěcímu a vypouštěcímu ventilu byla připojena průhledná hadice a vertikálně uchycena, tak aby bylo možné sledovat výšku hladiny. Po zapnutí čerpadla poklesla hladina u odvětrávacího ventilu (před čerpadlem) o 30 cm, u napouštěcího ventilu (za čerpadlem) hladina naopak o 30 cm vystoupala. Rozdíl výšky hladin (60 cm) odpovídá tlakovým ztrátám v systému mezi měřenými body, tedy zúžení potrubí před kanálem MHD generátoru, samotnému kanálu, zpětnému rozšíření potrubí, tlakové ztrátě v průtokoměru a obloukům a spojovacím úsekům potrubí. Celkové ztráty budou větší o velikost tlakových ztrát potrubí od čerpadla k měřicím hadicím.

2.1.6 Magnetický obvod

Magnetický obvod v MHD generátoru slouží k usměrnění magnetického toku do aktivní části kanálu mezi elektrodami.

Magnety

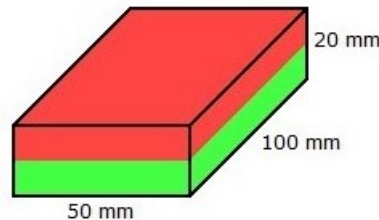
Zdrojem magnetického pole jsou 4 velké neodymové magnety. V současné době se jedná o nejsilnější komerčně dostupné permanentní magnety. Jsou tvořeny sloučeninou železa, neodymu a boru, Nd₂Fe₁₄B, jsou křehké a náchylné ke korozi. Proto

bývají na povrchu galvanizovány niklem, či zinkem [15]. Vzhledem k jejich velké magnetické síle je nutné pracovat s nimi velmi opatrně. V případě spojení dvou magnetů jsou schopné rozdrtit lidské kosti, zároveň se tříští a zranění mohou způsobit odletující úlomky. V magnetickém obvodu jsou použity kvádrové magnety s rozměry a rozdělením pólů tak jak je na obrázku 2.5 a parametry uvedenými v tabulce 2.1. Remanentní indukce B_r , koercitivní síla H_c a maximální energetický součin B_{hmax} jsou střední hodnoty převzaté od výrobce (viz [24]). Relativní permeabilita μ_r je dopočítána dle vztahu:

$$\mu_r = \frac{-B_r}{H_c \mu_0} \quad (2.9)$$

Tab. 2.1: Parametry použitých magnetů

B_r (T)	H_c (kA·m ⁻¹)	μ_r (-)	B_{hmax} (kJ·m ⁻³)
1,24	887,5	1,11	295

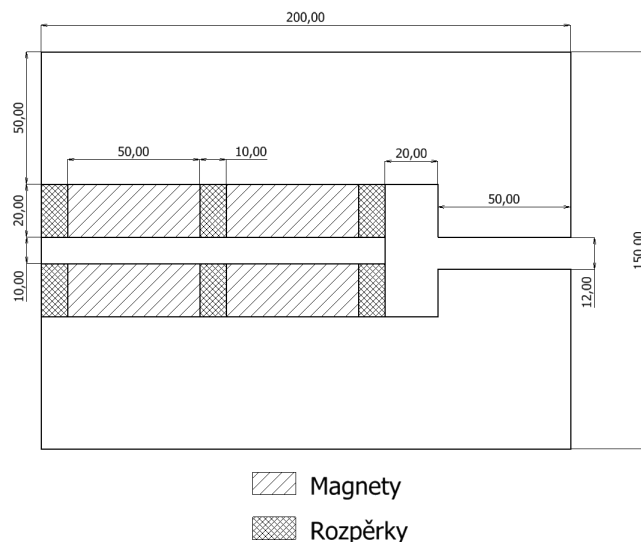


Obr. 2.5: Neodymový magnet

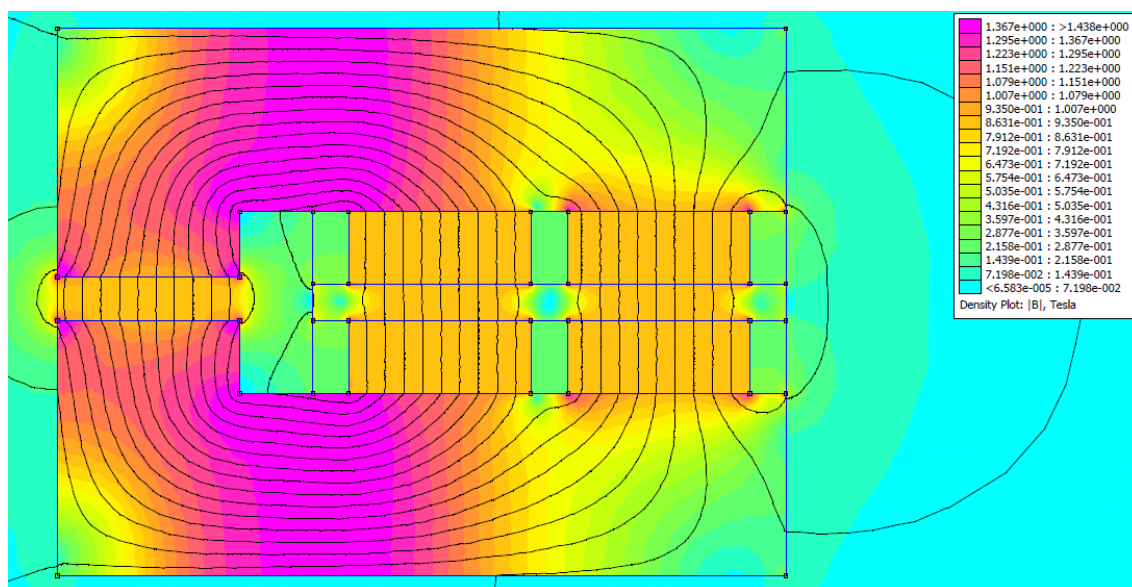
Návrh a konstrukce magnetického obvodu

Magnetický obvod musel být navržen s relativně velkou vzduchovou mezerou 12 mm, výška kanálu je 10 mm, přičemž 6 mm je výška elektrod a tedy i aktivní část MHD generátoru, 2 mm je tloušťka polykarbonátové desky, který uzavírá kanál na spodní a horní straně a dále je přidána rezerva 2 mm pro usnadnění manipulace s magnetickým obvodem. Každý magnet je umístěn ve vlastní komoře, která je oddělena rozpěrkami z nemagnetického materiálu. Tvar magnetického obvodu a důležité rozměry (v mm) můžeme vidět na obrázku 2.6. Hloubka magnetického obvodu (třetí

rozměr neuvedený na obrázku) je 100 mm, tak jako rozměr magnetů. Tělo magnetického obvodu je vyrobeno z konstrukční oceli ČSN 11375. Magnetický obvod byl nasimulován v programu FEMM, výsledek simulace můžeme vidět na obrázku 2.7. Hodnota magnetické indukce v mezeře je dle simulace rovna $B_m = 0,93$ T.



Obr. 2.6: Magnetický obvod



Obr. 2.7: Simulace v programu FEMM

Měření magnetické indukce

Měření magnetické indukce bylo provedeno dvěma teslametry, jejichž parametry můžeme vidět v tabulce 2.2. Průměrná naměřená hodnota magnetické indukce u obou

měřicích přístrojů byla 0,64 T. Vidíme zde výrazný rozdíl oproti hodnotě ze simulace pomocí programu FEMM. Důvodem pro tento rozdíl mohou být nepřesné hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly, jelikož pro danou magnetizaci je vždy uváděno rozmezí hodnot, v simulaci jsou použity střední hodnoty. Dalším faktorem je nedokonalá konstrukce magnetického obvodu. Komory pro magnety nemohou mít přesné rozměry magnetů, čímž následně vzniká těžko měřitelná parazitní vzduchová mezera. Magnetický obvod je dále sešroubován z pásovin o šířce 10 mm, které jsou vzhledem k magnetickému toku nevhodně natočeny, čímž vznikají další parazitní mikroskopické vzduchové mezery. Další malá odchylka mohla vzniknout díky šroubům, kterými je magnetický obvod spojen. Každou rozpěrkou prochází trojice šroubů M4, přes které se uzavírají magnetické siločáry.

Tab. 2.2: Parametry teslametrů

Výrobce	Typ	v. č.	Rozsah	Odchylka
F. W. BELL	5070	133095	0–2 T	$\pm (2 \% + 3 \text{ dg})$
Metra		6828832	0–2 T	$\pm 2,5 \%$

2.2 Použité pracovní látky

Jako pracovní látky byly otestovány především roztoky různých solí, které jsou jednoduše dostupné a mají vysokou elektrickou vodivost. Konkrétně se jedná o chlorid sodný (NaCl), tedy kuchyňskou sůl, dále uhličitán draselný (K_2CO_3) a také pentahydrát síranu měďnatého ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), známý pod názvem modrá skalice. Poté byla vyzkoušena také kyselina chlorovodíková (HCl) a hydroxid sodný (NaOH), které mají oproti solím výrazně vyšší vodivost. Problém kyselin a hydroxidů je jejich agresivita, obě zmíněné látky jsou silné žíraviny a podle toho je nutné s nimi zacházet. Měření byla provedena v co nejkratším čase, aby byla omezena reakce s kovovými prvky MHD generátoru, především čerpadla.

V tabulce 2.3 jsou uvedeny parametry všech použitých látek, w je hmotnostní zlomek udávající hmotnostní podíl sloučeniny v hmotnosti celého roztoku, γ je měrná elektrická vodivost roztoku a ρ je hustota roztoku. Měrná elektrická vodivost je závislá na teplotě roztoku, uvedené hodnoty platí pro 25 °C. Hodnoty vodivosti jsou převzaty z literatury (viz. [25]) a ověřeny přístrojem na měření vodivosti edge® HI2030-01 od společnosti Hanna. Kontrola nebyla provedena pro roztok kyseliny chlorovodíkové, jelikož maximální rozsah přístroje je $500 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. Hodnoty hustot jsou převzaty z literatury (viz [26]).

Roztoky byly vytvořeny rozpuštěním látky v nijak neupravované kohoutkové vodě. Teplota roztoků se pohybovala v rozmezí 22–25 °C. Teplota se odvíjela od aktuální teploty vzduchu v laboratoři. Dále také od doby měření, jelikož při proudění kanálem dochází k ohřívání roztoku třením o stěny potrubí a od čerpadla, které se při provozu zahřívá. Přesná teplota nebyla během měření zaznamenávána, jedná se o jeden z návrhů na optimalizaci generátoru uvedených na konci kapitoly.

Tab. 2.3: Použité roztoky

Sloučenina	w (%)	γ (mS·cm ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)
NaCl	20,0	226	1147,8
	10,0	140	1070,7
	5,0	78	1034,0
K ₂ CO ₃	25,0	232	1242,9
HCl	10,0	709	1047,6
CuSO ₄ · 5H ₂ O	17,5	52	1199,3
KOH	18,0	444	1162,6

2.3 Měření parametrů magnetohydrodynamického generátoru

2.3.1 Laboratorní podmínky

MHD generátor je umístěn v laboratoři na Ústavu energetiky na FEKT VUT v Brně. Měření zde probíhalo v rámci několika týdnů v měsících dubnu a květnu, během měření nebyly nikterak upravovány okolní podmínky, probíhalo tedy za atmosférického tlaku, teplota v laboratoři se pohybovala mezi 22 až 24 °C.

2.3.2 Měřicí přístroje

Nejdůležitějšími měřenými veličinami bylo napětí na elektrodách a generovaný proud. Napětí bylo měřeno stolním multimetrem Agilent 34410A se vstupním odporem 10 MΩ, proud byl měřen stolním multimetrem Rigol DM3061 s udávaným vnitřním odporem 11,025 Ω při rozsahu 20 mA. Důležité parametry přístrojů jsou uvedeny v tabulce 2.4, podrobná technická data je možné zjistit v technických listech přístrojů. Dále byla využívána odporová dekáda při měření voltampérových charakteristik, parametry jsou taktéž uvedeny v tabulce 2.4.

Tab. 2.4: Měřicí přístroje

Výrobce	Typ	v. č.	Rozsah	Odchylka
Agilent	34410A	34900262	1 V	$\pm (0,0035 \% + 0,0007 \%)$
Rigol	DM3061	MY47013494	20 mA	$\pm (0,05 \% + 0,07 \%)$
Metra	L110	9109306	0,1–100 k Ω	$\pm 0,1 \% + (15 \text{ m}\Omega \pm 3 \text{ m}\Omega)$

Chyba měřicích přístrojů

Absolutní chybu měření u digitálního přístroje Δ_{DP} lze určit pomocí následujícího vztahu [28]:

$$\Delta_{DP} = \frac{\delta_M \cdot X_M + \delta_R \cdot X_R}{100} \quad (2.10)$$

kde δ_M je mezní chyba z měřené hodnoty a δ_R je chyba z největší hodnoty měřicího rozsahu. Tyto údaje jsou udávány výrobcem přístroje, zde jsou uvedeny v kolonce *Odchylka* v tabulce 2.4. Dále je ve vztahu použita měřená hodnota X_M a použitý rozsah měřicího přístroje X_R .

Multimetrem Rigol byl měřen elektrický proud řádově od jednotek μA do několika tisíc μA při rozsahu 20 mA. Multimetrem Agilent bylo měřeno elektrické napětí od jednotek mV do 200 mV na rozsahu 1 V. Pro přehlednost jsou chyby v uvedených rozsazích uvedeny již nyní v tabulce 2.5. Vidíme, že přesnost měření napětí je velmi vysoká, při měření jednotek mV je absolutní chyba pouze asi 7 tisícín mV, při měření napětí 200 mV je absolutní chyba 14 tisícín mV, což jsou zanedbatelné hodnoty. Přesnost měření proudu při měření jednotek mikroampér již zanedbatelná není, absolutní chyba přesahuje 1 μA . Jednotky μA jsou ale minimální proudy měřené na MHD generátoru při zatížení velkým odporem, který odpovídá stavu naprázdno. Důležité je, že chyba s rostoucím proudem roste velmi málo, při měření stovek μA je relativní chyba menší než 1 %.

2.3.3 Korekce měřeného průtoku

Jak bylo popsáno v kapitole věnující se průtokoměru, plovákové průtokoměry jsou závislé na hustotě měřené látky. V tabulce 2.6 je proveden přepočet pro použité látky. Jsou zde uvedeny vždy maximální a minimální průtok Q_{max} a Q_{min} , při kterých bylo měření prováděno. Následuje korekční součinitel Q_1/Q_2 určený podle vztahu 2.1 a skutečná hodnota průtoku Q'_{max} a Q'_{min} , která je určena jako podíl měřené hodnoty a korekčního součinitele. V poslední řádce jsou uvedeny hodnoty pro čistou vodu, pro kterou je průtokoměr kalibrován a která slouží jako reference. Vidíme, že určené

Tab. 2.5: Absolutní chyba měřicích přístrojů

U (mV)	Δ_U (mV)	I (μ A)	Δ_I (μ A)
0	0,0070	0	1,20
1	0,0070	1	1,20
5	0,0072	10	1,21
10	0,0074	100	1,28
50	0,0088	500	1,58
100	0,0105	1000	1,95
200	0,0140	5000	4,95

průtoky u ostatních látek vycházejí větší než u čisté vody, přestože průtok by měl být velmi podobný, spíše menší. Roztoky sloučenin mají větší viskozitu, s kterou se zvyšují také tlakové ztráty. Na tomto případu vidíme nepřesnost průtokoměru, která je popsána v kapitole 2.1.3.

Tab. 2.6: Korekční součinitel pro měření průtoku

Sloučenina	w (%)	ρ (kg·m ⁻³)	Q_{max} (m ³ ·h ⁻¹)	Q_{min} (m ³ ·h ⁻¹)	Q_1/Q_2 (-)	Q'_{max} (m ³ ·h ⁻¹)	Q'_{min} (m ³ ·h ⁻¹)
NaCl	20,0	1148	2,0	1,0	1,11	1,80	0,90
	10,0	1071	1,8	0,8	1,05	1,71	0,76
	5,0	1034	1,7	0,8	1,03	1,66	0,78
K ₂ CO ₃	25,0	1243	2,0	1,0	1,18	1,69	0,84
HCl	10,0	1048	1,8	0,8	1,04	1,69	0,77
CuSO ₄ ·5H ₂ O	17,5	1199	2,0	1,0	1,15	1,74	0,87
KOH	18,0	1163	1,8	0,8	1,12	1,60	0,71
H ₂ O	0,0	998	1,6	0,8	1,00	1,60	0,80

2.3.4 Napětí naprázdno

Základním parametrem, který byl na magnetohydrodynamickém generátoru měřen, je napětí naprázdno na elektrodách, tedy bez připojené zátěže. Toto napětí zároveň sloužilo jakožto základní důkaz fungování generátoru. Velký problém představovalo parazitické napětí, které bylo na elektrodách přítomno i při vypnutém čerpadlu nehlédě na přítomnost magnetického pole. Toto napětí v řádu desítek (výjimečně až stovek) milivoltů bylo s nejvyšší pravděpodobností způsobeno polarizací elektrod

a souvisejícími elektrochemickými jevy, které jsou zmíněny výše (viz kapitola 1.3). Velikost tohoto napětí byla velmi nestálá, ale bylo možné vypočítat pozvolný nárůst s menší se strmostí, který by mohl být přirovnán k nabíjení kapacity. Při zkratování elektrod bylo možné měřit elektrický proud (desítky až stovky mikroampér), po rozpojení elektrod došlo k opětovnému nárůstu napětí. Generované napětí MHD generátorem bylo tedy měřeno jako rozdíl mezi tímto parazitním napětím na elektrodách při vypnutém čerpadlu, tím pádem při nulovém průtoku pracovní látky a napětím změřeném při zapnutém čerpadlu a změřeným průtokem pomocí průtokoměru. Vzhledem k velikosti generovaného napětí, které bylo řádově podobné s parazitním napětím, vyvstaly pochybnosti o prokázání funkčnosti generátoru. Následně tedy byla provedena řada experimentů, které úspěšně prokázaly generování elektrického napětí a proudu pomocí magnetohydrodynamického jevu. Výsledkem těchto experimentů jsou tyto poznatky:

- při provozu generátoru bez přítomnosti magnetického pole nebyla změřena žádná závislost napětí na průtoku
- při provozu generátoru s magnetickým obvodem byla závislost na průtoku jasně měřitelná
- při otočení magnetického obvodu a tedy otočení směru magnetického toku došlo ke změně polarity generovaného napětí
- polarita generovaného napětí odpovídala teoreticky stanovené pomocí Flemingova pravidla levé ruky
- měřený zkratový proud bez přítomnosti magnetického pole nejevil žádnou závislost na průtoku
- zkratový proud byl s přítomností magnetického pole výrazně větší a jevil výraznou závislost na průtoku

Kvantitativní vyhodnocení těchto jevů následuje ve formě změřených závislostí generovaného napětí na průtoku pracovní látky a vyhodnocených voltampérových charakteristik.

Závislost napětí naprázdno na průtoku

Indukované napětí naprázdno v generátoru lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$U_t = lvB \quad (2.11)$$

kde l (m) je vzdálenost elektrod, v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) rychlost proudění pracovní látky a B (T) je velikost magnetické indukce v prostoru kanálu. Jedná se tedy o teoretickou hodnotu napětí, které by mělo být indukováno. Velikost tohoto napětí v závislosti na průtoku Q můžeme vidět v tabulce 2.7, kde v je rychlost proudění pracovní látky,

kterou lze určit na základě průtoku a průřezu kanálu S (m^2):

$$v = \frac{Q}{S} \quad (2.12)$$

Tab. 2.7: Teoretické napětí naprázdno

Q ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	v ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	U_t (mV)
0,8	0,93	24
1,0	1,12	30
1,2	1,39	36
1,4	1,62	41
1,6	1,85	47

V tabulce 2.8) již jsou uvedeny naměřené hodnoty napětí na elektrodách. Měření bylo provedeno s 1% roztokem NaCl, změna hustoty při takto malé koncentraci je vzhledem k přesnosti měření průtokoměru zanedbatelná. Korekce měření průtoku pro měření kapaliny o jiné hustotě je tedy v tomto případě zanedbána. Písmena C, M a B udávají označení elektrod, tak je uvedeno výše (viz kapitola 2.1.4), ke každé dvojici elektrod je přiřazeno změřené parazitní napětí U_0 , které se na elektrodách vyskytovalo při nulovém průtoku pracovní látky. Následně je pro každou dvojici elektrod uvedeno změřené napětí na elektrodách U při daném průtoku a na závěr napětí ΔU , určené jako rozdíl měřeného a parazitního napětí: $\Delta U = U - U_0$. Toto napětí je rovno skutečnému napětí indukovanému v magnetohydrodynamickém generátoru.

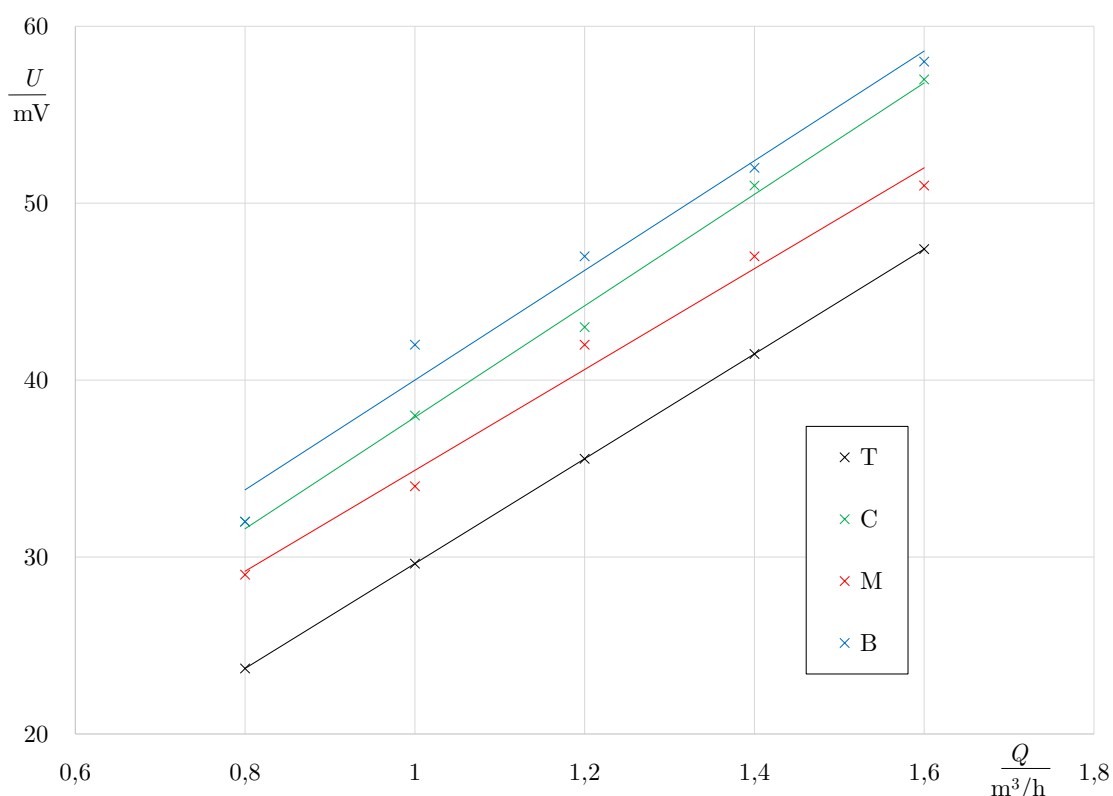
Tab. 2.8: Měřené napětí naprázdno

Q ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	C		M		B	
	$U_0 = 78 \text{ mV}$		$U_0 = -4 \text{ mV}$		$U_0 = 74 \text{ mV}$	
	U (mV)	ΔU (mV)	U (mV)	ΔU (mV)	U (mV)	ΔU (mV)
0,8	110	32	25	29	106	32
1,0	116	38	30	34	116	42
1,2	121	43	38	42	121	47
1,4	129	51	43	47	126	52
1,6	135	57	47	51	132	58

Vidíme, že indukované napětí na jednotlivých elektrodách není vždy při stejném průtoku totožné. Tato chyba je způsobena především již několikrát zmiňovaným

parazitním napětím a jeho nestálostí. Další nepřesnost může být způsobena chybami průtokoměru, o kterých je pojednáno výše (viz kap. 2.1.3). Důležitým poznatkem je ale skutečnost, že indukované napětí odpovídá teoretické hodnotě, v nejpříznivějším měření na elektrodách M absolutní chyba nepřesáhne 5 mV. Jak je vidět na obrázku 2.8, na kterém jsou všechny závislosti porovnány, míra závislosti na průtoku, tedy směrnice přímk, je vždy velmi podobná.

Napětí naprázdno je také změřeno při každém měření voltampérové charakteristiky, jejichž vyhodnocení následuje. Měřená hodnota při maximálním průtoku se vždy pohybuje rozmezí 40 až 60 mV. Při minimální průtoku se měřené napětí pohybuje v rozmezí od 28 do 36 mV.



Obr. 2.8: Závislost napětí naprázdno generátoru na průtoku

Speciální kombinace zapojení elektrod

V teoretické části jsou popsány základní typy MHD generátorů dle zapojení elektrod. Jejich vyzkoušení byl jeden z důvodů pro volbu tří separovaných elektrod namísto jedné celistvé. Prvním pokusem byla snaha o zapojení, kdy jsou elektrody propojeny diagonálně. Při zapojení pouze dvou elektrod diagonálně (např. C a B) bylo generované napětí o několik jednotek milivoltů větší než při klasickém zapojení protichůdných elektrod. Vzhledem k polarizaci elektrod je takto malý rozdíl těžko

kvantifikovatelný, s jistotou lze ale tvrdit, že došlo k malému nárůstu. Dále byly elektrody spojeny do série, což odpovídá zapojení podle Montradyho, tedy vodivé spojení diagonálně elektrod M a C a druhé elektrody C s protilehlou B. Napětí bylo odebíráno z nezapojené elektrody M a B. Snaha byla o dosažení trojnásobně většího napětí vzhledem k zapojení do série, bohužel se tato očekávání nenaplnila a generované napětí bylo stejné jako při diagonálním spojení pouze jedné dvojice elektrod, podobně jako v předchozím případě. Generované napětí při tomto zapojení závisí na parametru α (viz kapitola 1.2.4) a proto není možné jej jednoduše sčítat. Posledním pokusem bylo měření napětí mezi elektrodami na jedné straně kanálu. V tomto směru by mělo být indukováno Hallovo napětí. Při zapnutí čerpadlo došlo k nárůstu napětí pouze asi o 2 až 3 mV, což je vzhledem k polarizaci elektrod těžko měřitelná hodnota. Opět je ale možné s jistotou tvrdit, že k pozorovatelné změně došlo.

2.3.5 Voltampérová charakteristika generátoru

Dalším důležitým měřeným parametrem byla voltampérová (VA) charakteristika. Měřena byla pro rozličné pracovní látky a zapojení elektrod MHD generátoru. Do měřicího obvodu byla zapojena odporová dekáda, pomocí které bylo měněno zatížení generátoru od 100 k Ω až do zkratu, který byl omezen vnitřním odporem ampérmetru. Vyhodnocení charakteristik s přítomností parazitního chemického článku by bylo zatíženo příliš velkou chybou, která by znehodnocovala výsledky. Z tohoto důvodu byl vždy na parazitním článku změřen zkratový proud a napětí naprázdno, čímž byla vytvořena korekční přímka. Naměřená data byla součtem magnetohydrodynamického generátoru a parazitního článku. Vzhledem k tomu, že tato celková VA charakteristika vykazuje lineární charakter, byla korekční přímka jednoduše odečtena od naměřené charakteristiky, čímž vznikla výsledná charakteristika popisující parametry magnetohydrodynamického zdroje. Toto vyhodnocení je stále zatíženo chybou, která plyne z nestálosti parametrů parazitního článku a také lineární aproximací naměřené charakteristiky. I přes tyto nepřesnosti můžeme dobře vidět činnost MHD generátoru, což bylo primárním účelem této práce.

Měření s roztokem uhličitanu draselného

U vyhodnocení měření s roztokem uhličitanu draselného (K_2CO_3) je podrobně popsáno, jakým způsobem byla data naměřena a vyhodnocena a také jsou popsány chyby a zjednodušení, ke kterým během měření a vyhodnocení došlo. Měření s dalšími roztoky byla provedena a vyhodnocena velmi podobně, popsány již jsou stručněji s důrazem na zjištěná fakta a vlastnosti týkající se fungování MHD generátoru.

V tabulce 2.9 můžeme vidět kompletní soubor hodnot základních parametrů při měření s roztokem uhličitanu draselného. Měření bylo provedeno při spojení všech elektrod paralelně (C+M+B), při spojení dvou elektrod paralelně (C+M) a pro každou dvojici elektrod samostatně, vždy pro maximální průtok a minimální průtok, který bylo čerpadlo schopno dodat. U_0 a I_{k0} je parazitní napětí naprázdno a parazitní zkratový proud při nulovém průtoku, U_m a I_{km} je napětí na generátoru naprázdno a maximální zkratový proud při běžícím čerpadle. U'_0 a I'_{k0} jsou napětí naprázdno a proud nakrátko daný generátorem, určené jsou jako rozdíl hodnot při běžícím a vypnutém čerpadle.

$$U'_0 = U_m - U_0 \quad (2.13)$$

$$I'_{k0} = I_{km} - I_{k0} \quad (2.14)$$

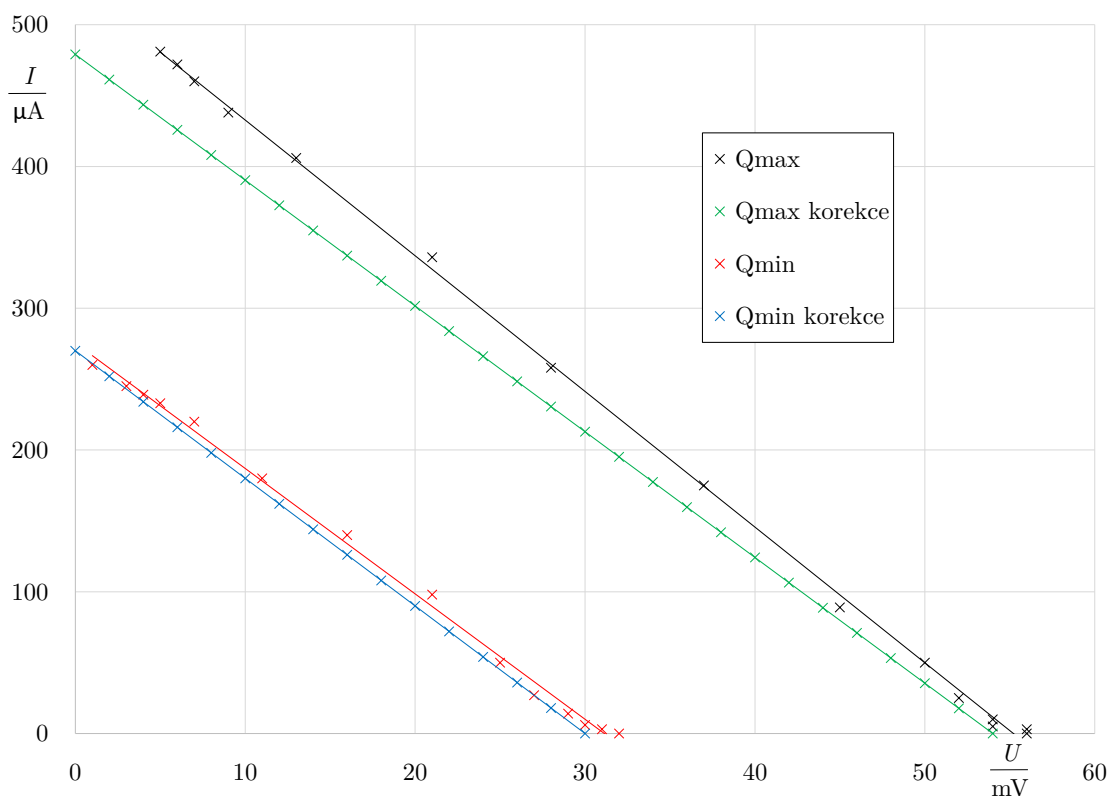
Tab. 2.9: K_2CO_3 , 25 %, základní parametry

		U_0 (mV)	I_{k0} (μA)	U_m (mV)	I_{km} (μA)	U'_0 (mV)	I'_{k0} (μA)
C+M+B	Q_{max}	2	2	56	481	54	479
	Q_{min}	1	-10	31	260	30	270
C	Q_{max}	-6	-20	54	155	60	175
	Q_{min}	-6	-20	30	85	36	105
M	Q_{max}	-11	-50	35	120	46	170
	Q_{min}	11	-60	17	48	28	108
B	Q_{max}	65	57	117	116	49	59
	Q_{min}	59	57	90	90	31	33
C+M	Q_{max}	-10	-70	39	260	49	330
	Q_{min}	-10	-70	22	148	32	218

V tabulce 2.10 jsou následně uvedeny veškeré naměřené hodnoty VA charakteristik pro jednotlivé varianty měření. Na obrázku 2.9 jsou vyneseny konkrétní VA charakteristiky pro měření se paralelně spojenými elektrodami¹. Závislost označená Q_{max} je dána naměřenými hodnotami při maximální průtoku, závislost označená

¹Podobným způsobem jsou vyhodnocena všechna měření se všemi sloučeninami, pro přehlednost jsou nyní uvedeny pouze některé. Všechna ostatní grafická zpracování jsou uvedeny v příloze A

Q_{max} korekce představuje VA charakteristiku MHD generátoru po provedení korekce vylučující vliv parazitních chemických článků. Jedná se o přímku danou hodnotami U'_0 a I'_{k0} . Tímto samozřejmě dochází ke zjednodušení. Parazitní zkratový proud I_{k0} je idealizován pro nulové napětí, zatímco maximální proud I_{km} je uveden s napětím několika jednotek mV, které je dáno především vnitřním odporem ampérmetru. Stejný postup je aplikován i u měření s minimální průtokem označené Q_{min} i pro všechna další měření se všemi roztoky. Na popisovaném grafu zároveň dobře vidíme závislost na průtoku pracovní látky. S větším průtokem roste nejenom generované napětí, ale také generovaný proud.



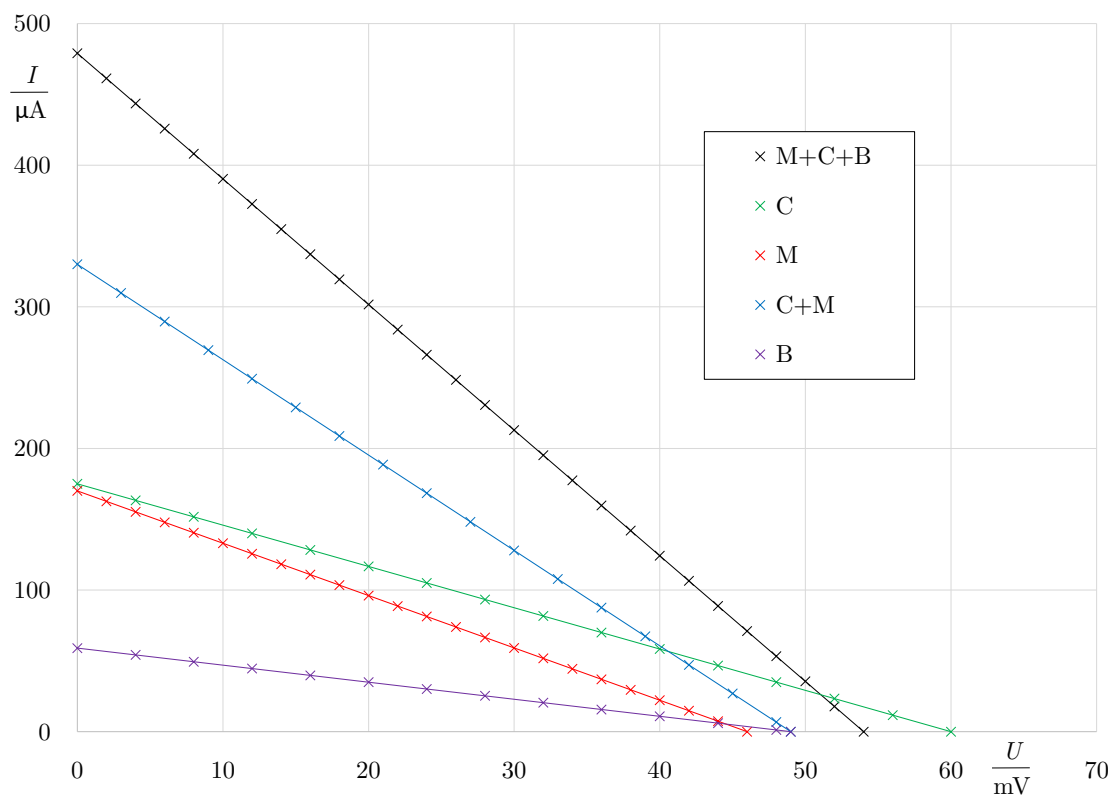
Obr. 2.9: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C+B+M

Na obrázku 2.10 jsou porovnány veškeré výsledné VA charakteristiky při maximální průtoku (Q_{max} korekce) pro všechny měřené zapojení elektrod. Paralelní spojení elektrod představuje zvětšení plochy elektrody a tím pádem i zvětšení aktivního objemu kanálu generátoru, čím dochází ke zvyšování výkonu generátoru. Lze tedy očekávat nárůst generovaného proudu s rostoucí plochou elektrod. Tato očekávání se také potvrdila. Při paralelním spojení všech elektrod vidíme výrazný nárůst oproti spojení dvou elektrod, které zase generují větší proud než jednotlivé elektrody. U elektrod označených B vidíme výrazný propad generovaného proudu oproti elektrodám C a M. Toto je pravděpodobně způsobeno kombinací výše zmí-

Tab. 2.10: K₂CO₃, 25 %, VA charakteristiky

C+B+M						C+M						C						B						M					
Q_{max}			Q_{min}			Q_{max}			Q_{min}			Q_{max}			Q_{min}			Q_{max}			Q_{min}			Q_{max}			Q_{min}		
U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I
(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)
56	0	32	0	39	0	22	0	54	0	30	0	35	0	17	0	35	0	35	0	17	0	35	0	17	0	35	0	17	0
56	3	31	1	39	1	22	1	54	2	29	1	34	2	16	1	33	6	33	6	16	1	33	6	16	1	33	6	16	3
54	5	31	2.8	38	4	22	2	53	5	29	3	33	6	16	3	31	15	31	15	15	3	31	15	15	3	31	15	15	7
54	10	30	5.7	38	7	22	4	52	10	28	5	31	15	15	7	28	27	28	27	13	7	28	27	13	7	28	27	13	13
52	25	29	14	37	18	21	10	47	23	26	12	28	27	13	13	23	45	23	45	11	13	23	45	11	21	23	45	11	21
50	50	27	27	35	34	20	20	41	41	24	23	23	45	11	21	16	75	16	75	8	11	16	75	8	35	16	75	8	35
45	89	25	50	32	62	19	36	34	66	19	36	16	75	8	35	10	91	10	91	5	40	10	91	5	40	10	91	5	40
37	175	21	98	24	117	14	67	22	104	12	58	10	91	5	40	6	104	6	104	3	46	6	104	3	46	6	104	3	46
28	258	16	140	10	165	10	95	13	125	7	67	6	104	3	46	2	113	2	113	2	48	2	113	2	48	2	113	2	48
21	336	11	180	13	210	7	122	8	141	5	75	3	110	2	48	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120
13	406	7	220	7	225	4	135	5	149	3	80	2	113	2	48	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120
9	438	5	233	5	250	3	140	3	150	2	82	2	115	2	48	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120
7	460	4	239	4	257	2	145	2	152	1	85	1	116	1	116	1	116	1	116	1	116	1	116	1	116	1	116	1	116
6	472	3	245	3	260	1	148	1	155																				
5	481																												

něných chyb a nepřesností. Tyto nepřesnosti také dobře ilustruje napětí naprázdno, které je u všech případů stejné, jelikož je na ploše elektrod nezávislé. Jak ale vidíme při měření dochází k rozptylu téměř o 15 mV. Velmi podobná je situace při vyhodnocení měření s minimálním průtokem, s jedinou změnou, kterou je očekávaný celkový pokles generovaného proudu.



Obr. 2.10: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, porovnání zapojení elektrod při maximální průtok

Měření s roztokem chloridu sodného

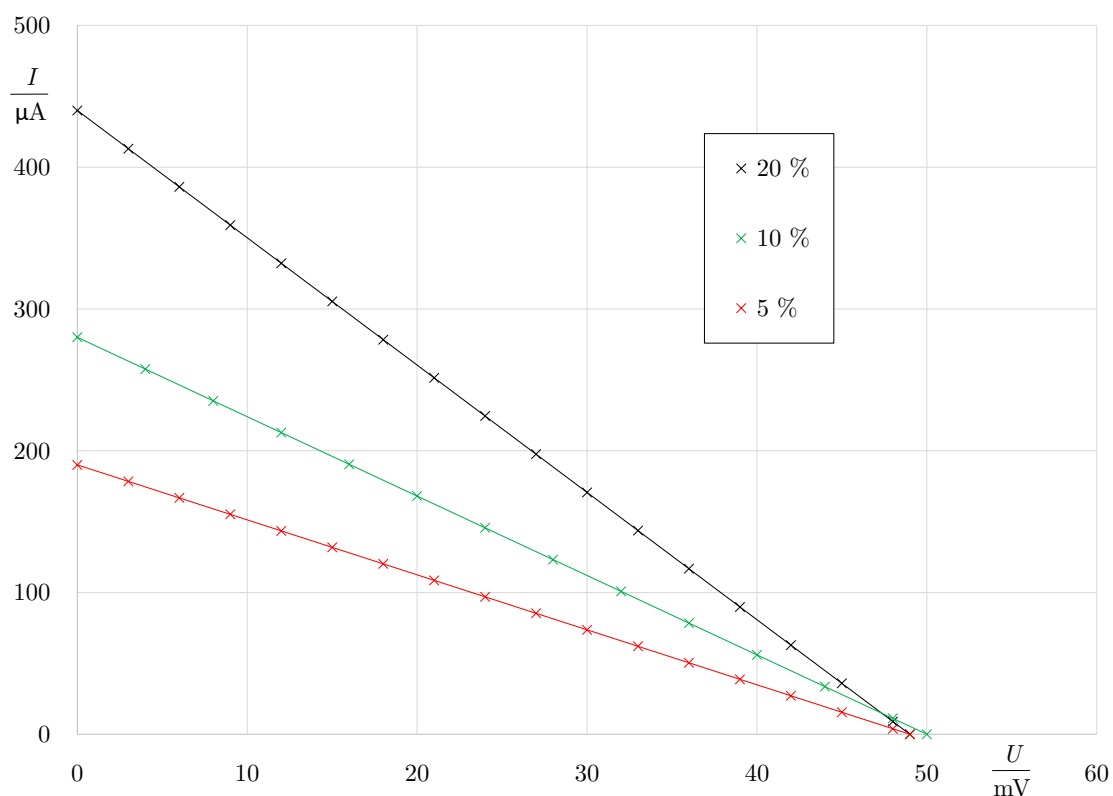
U měření s roztokem chloridu sodného (NaCl) byla ověřena závislost generovaného proudu na vodivosti pracovní látky měřením při různých koncentracích. Dle teoretických předpokladů by mělo dojít k nárůstu generovaného proudu se zvyšující se koncentrací a tedy vodivostí. Měření bylo provedeno a vyhodnoceno stejným způsobem jak bylo popsáno výše (viz kapitola 2.3.5). V tabulce 2.11 jsou uvedeny základní parametry měření a v tabulce 2.12 jsou uvedeny veškeré naměřené hodnoty VA charakteristik. Jak je vidno z obrázku 2.11, teoretický předpoklad se beze zbytku potvrdil a vidíme jednoznačný nárůst proudu se zvyšující se koncentrací, velmi podobná situace nastává při měření s minimální průtokem.

Tab. 2.11: NaCl, základní parametry

w (%)		U_0 (mV)	I_{k0} (μ A)	U_m (mV)	I_{km} (μ A)	U'_0 (mV)	I'_{k0} (μ A)
20	Q_{max}	8	60	57	500	49	440
	Q_{min}	8	60	37	300	29	240
10	Q_{max}	48	130	98	410	50	280
	Q_{min}	36	112	66	290	30	178
5	Q_{max}	22	40	71	230	49	190
	Q_{min}	20	40	48	150	28	110

Tab. 2.12: NaCl, VA charakteristiky

20 %				10%				5 %			
Q_{max}		Q_{min}		Q_{max}		Q_{min}		Q_{max}		Q_{min}	
U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I
(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)	(mV)	(μ A)
57	0	37	0	98	0	66	0	71	0	48	0
56	5	32	60	97	10	65	12	69	3	47	3
55	27	26	120	96	20	62	30	68	6	46	7
53	52	18	180	91	45	58	57	67	13	43	20
48	94	12	230	84	83	48	94	63	31	40	37
40	180	6	245	68	134	35	167	58	57	31	60
31	270	3	280	48	220	23	212	50	94	20	100
22	340	1	300	32	290	16	270	30	140	13	120
13	420			21	340	8	270	20	180	8	135
9	440			12	380	6	280	13	207	3	140
7	455			6	386	5	280	7	220	1	150
1	500			5	390	1	290	1	230		
				1	410						



Obr. 2.11: VA charakteristika, NaCl, C+B+M, porovnání koncentrací

Měření s kyselinou chlorovodíkovou, hydroxidem sodným a modrou skalicí

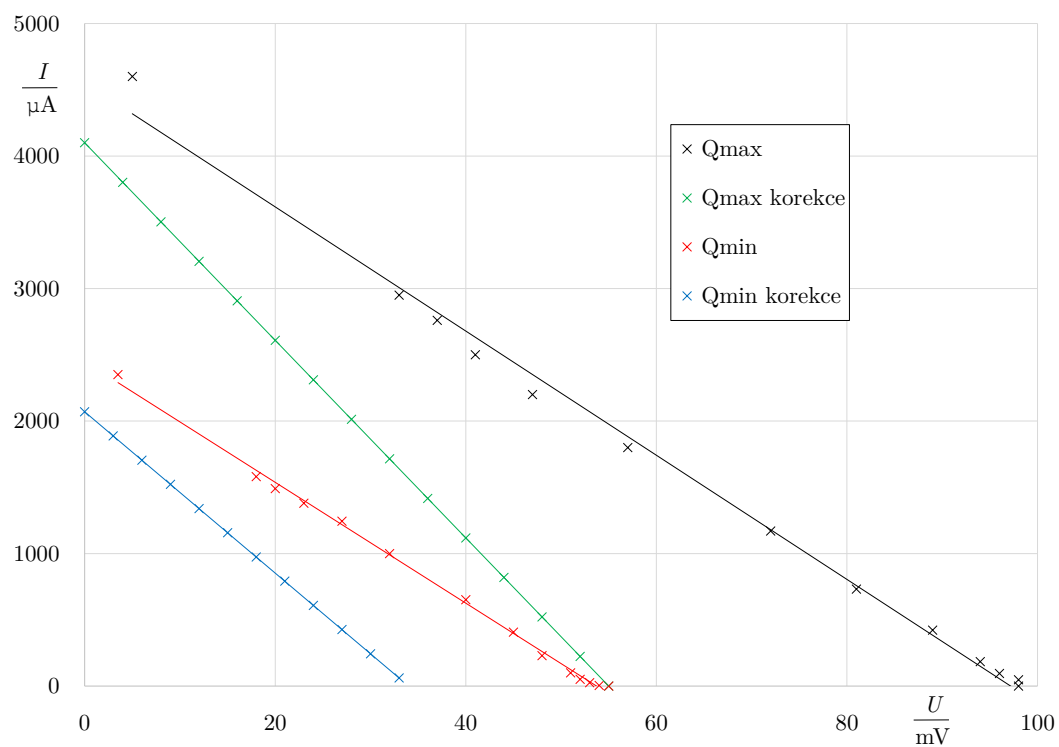
Měření s kyselinou chlorovodíkovou (HCl), hydroxidem draselným (KOH) a modrou skalicí ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) je vyhodnoceno společně, jelikož byla naměřena vždy jen základní charakteristika pro maximální a minimální průtok s paralelním spojením všech elektrod s účelem porovnání různých sloučenin a jejich vodivostí. V tabulce 2.13 jsou uvedeny základními parametry a v tabulce 2.14 naměřené hodnoty VA charakteristik. Použitý 10% roztok kyseliny chlorovodíkové měl ze všech roztoků nejvyšší vodivost, která se projevila velkým nárůstem generovaného proudu. Maximální hodnota dokonce přesáhla 4 mA. VA charakteristiku pro toto měření můžeme vidět na obrázku 2.12. Velký rozdíl mezi dvěma posledními měřenými hodnotami je dán přepnutím ampérmetru na větší rozsah s menším vnitřním odporem. Na obrázku 2.13 je zobrazeno porovnání všech měřených sloučenin pro maximální průtok s paralelním spojením všech elektrod. Charakteristiky jednotlivých sloučenin odpovídají jejich vodivostem, chlorid sodný a uhličitan draselný mají velmi podobnou vodivost a také velmi podobné charakteristiky, následuje nárůst u hydroxidu draselného a následně u kyseliny chlorovodíkové. Zajímavé jsou hodnoty u modré skalice. Její vodivost je ze všech roztoků výrazně nejnižší, přesto vidíme vyšší generovaný proud než u uhličitanu draselného a chloridu solného. Bylo by vhodné toto měření zopakovat po provedení optimalizací měření, které jsou uvedeny ke konci práce (viz kapitola 2.4).

Tab. 2.13: KOH, HCl, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, základní parametry

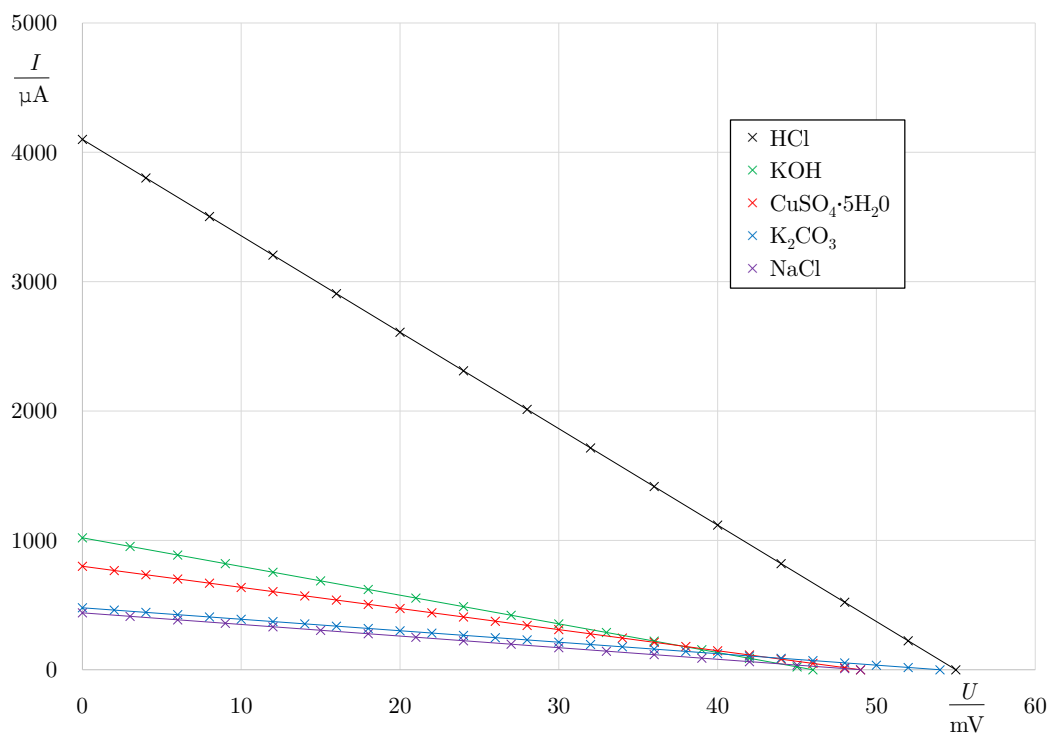
		U_0 (mV)	I_{k0} (μA)	U_m (mV)	I_{km} (μA)	U'_0 (mV)	I'_{k0} (μA)
KOH (18 %)	Q_{max}	32	480	78	1500	46	1020
	Q_{min}	27	286	57	990	30	704
HCl (10 %)	Q_{max}	43	500	98	4600	55	4100
	Q_{min}	21	280	55	2350	34	2070
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (17,5 %)	Q_{max}	16	130	65	930	49	800
	Q_{min}	17	115	45	612	28	497

Tab. 2.14: KOH, HCl, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, VA charakteristiky

KOH				HCl				$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$			
Q_{max}		Q_{min}		Q_{max}		Q_{min}		Q_{max}		Q_{min}	
U	I	U	I	U	I	U	I	U	I	U	I
(mV)	(μA)	(mV)	(μA)	(mV)	(μA)	(mV)	(μA)	(mV)	(μA)	(mV)	(μA)
78	0	58	0	98	0	55	0	65	1	45	0
78	15	58	8	98	48	54	5	64	10	44	5
77	38	56	25	96	95	53	26	63	25	43	14
75	74	55	52	94	184	52	51	62	38	42	34
71	140	53	104	89	422	51	100	61	50	41	50
66	310	48	227	81	732	48	230	60	65	40	65
54	530	41	365	72	1170	45	407	59	73	39	76
42	810	32	520	57	1800	40	652	59	82	38	93
25	1150	21	680	47	2200	32	1000	58	94	36	118
14	1282	16	760	41	2500	27	1244	57	111	35	136
9	1400	10	880	37	2760	23	1380	55	135	34	160
14	1282	6	950	33	2950	20	1490	53	171	32	190
9	1400	1	990	5	4600	18	1580	52	197	30	229
2	1500					4	2350	50	234	29	257
								47	274	28	270
								43	331	26	287
								41	367	25	307
								39	403	23	330
								35	487	21	357
								32	527	19	388
								29	575	17	428
								26	634	14	476
								22	700	11	540
								17	810	9	580
								14	860	7	612
								10	930	2	716



Obr. 2.12: VA charakteristika, HCl, 10 %,C+B+M



Obr. 2.13: Porovnání všech testovaných roztoků (koncentrace NaCl 20 %), maximální průtok, C+B+M

2.4 Návrhy na optimalizaci magnetohydrodynamického generátoru

Model magnetohydrodynamického generátoru sestrojený v rámci této práce je poměrně unikátní zařízení, existuje tedy málo literatury věnující se podobné problematice. Jedná se v podstatě o prototyp vytvořený na základě elementárních teoretických myšlenek. Z těchto důvodů se během konstrukce a testování vyskytlo nemalé množství problémů, přičemž zdaleka ne všechny byly úspěšně překonány. S nabytými zkušenostmi je nyní možné navrhnout řadu kroků, které mohou posloužit k vylepšení parametrů MHD generátoru a ke zpřesnění jejich stanovení.

2.4.1 Konstrukce

Téměř veškeré konstrukční práce na generátoru týkající se tvorby kanálu, potrubní smyčky, či magnetického obvodu byly provedeny s ohledem na konstrukční jednoduchost, vybavení a prostorové možnosti laboratoře. V tomto směru je prostor ke zlepšení parametrů jednotlivých komponent MHD generátoru. Příkladem může být zakázková výroba magnetického obvodu s minimalizací parazitních vzduchových mezer, sloužící ke zlepšení účinnosti magnetického obvodu, nebo detailní návrh potrubní smyčky a přechodu mezi potrubím a kanálem MHD generátoru s cílem minimalizovat tlakové ztráty a maximalizovat průtok. Zlepšení parametrů je možné dosáhnout také konstrukcí v celkově větším měřítku.

2.4.2 Elektrochemické jevy

Velkým problémem při měření parametrů byla polarizace elektrod související s elektrochemickými jevy na rozmezí elektrod a pracovní látky. Možným řešením by mohlo být použití vhodné kombinace materiálu elektrod a pracovní látky, při které k polarizaci elektrod nedochází, případně použití vhodné depolarizační látky zmiňované v již dříve uvedené literatuře (viz [27]).

2.4.3 Optimalizace měření

Další důležitou oblastí je samotné měření parametrů. V tomto směru byla největším nedostatkem absence měření aktuální teploty pracovní látky při provozu generátoru. Tento problém by bylo možné vyřešit umístěním teplotního čidla do potrubí v blízkosti kanálu. Další možností vylepšení by mohlo být umístění topného článku, který by udržoval konstantní teplotu během měření, případně by mohl sloužit k ohřevu pracovní látky a tím ke zvýšení vodivosti. Problematické bylo též měření průtoku, které již bylo popsáno v kapitole věnující se průtokoměru.

3 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala sestrojením malého laboratorního modelu magnetohydrodynamického generátoru s využitím permanentních magnetů a vodivou látkou tvořenou roztoky anorganických sloučenin. V teoretické části práce jsou vysvětleny základní teoretické principy zapříčiňující činnost MHD generátoru a uveden základní přehled typů těchto generátorů. Dále následuje stručná charakteristika vodivosti kapalin, jež zde hraje zásadní roli a také je nastíněna problematika, kterou použití roztoků solí, kyselin a zásad představuje při měření parametrů modelu.

V experimentální části je popsán samotný model MHD generátoru, který byl zkonstruován a který je spolu s jeho naměřenými parametry stěžejním výstupem z této práce. Je zde uvedena problematika návrhu a konstrukce jednotlivých prvků modelů. Konkrétně se jedná o cirkulační smyčku s čerpadlem a průtokoměrem, dále pak o magnetický obvod a o kanál generátoru s elektrodami. Následuje samotné měření parametrů na modelu MHD generátoru, podrobně je popsána měřicí metoda spolu s možnými nepřesnostmi. Zhodnocena je také chyba měřicích přístrojů a možné vlivy okolí. Samozřejmostí je uvedení a popsání veškerých naměřených hodnot a poznatků, jež jsou zhodnoceny v následujících odstavcích.

Při vyhodnocování naměřených parametrů je nejprve nutné poznamenat, že prvotním cílem této práce bylo samotné ověření teoretické funkce MHD generátoru s vodivým roztokem. Pro tento účel byl model navržen a od základu sestaven.

Základním parametrem, který lze na generátoru měřit, je napětí na nezátížených elektrodách a jeho závislost na průtoku, respektive rychlosti proudění pracovní látky. Při srovnání měřeného napětí s teoreticky určeným vidíme, že hodnoty velmi dobře odpovídají. Maximální teoretická hodnota je $U_t = 47$ mV. Měřené hodnoty na jednotlivých elektrodách jsou 51, 57 a 58 mV. Odchylky jsou z největší části způsobeny nemožností přesně eliminovat vliv polarizace elektrod. Další srovnání přináší vyhodnocené VA charakteristiky, při kterých je napětí na prázdko také vždy měřeno. Vidíme zde rozptýl asi od 45 mV do 55 mV, výjimečně až do 60 mV. Při všech měřeních je maximální generované napětí v blízkosti teoretické hodnoty, díky čemuž můžeme potvrdit funkci magnetohydrodynamického generátoru. Jiným ověřením je závislost napětí na průtoku, která je jasně prokázána na obrázku 2.8, kde je strmost nárůstu velmi podobná u všech měření i u teoretických hodnot.

Dalším měřeným parametrem byla voltampérová charakteristika generátoru, při jejímž vyhodnocení bylo nutné eliminovat vliv polarizace elektrod korekční křivkou. Díky naměřeným VA charakteristikám byla prokázána schopnost generovat elektrický proud a také byla ověřena závislost na průtoku pracovní látky. Měření bylo provedeno vždy pro maximální a minimální průtok, který bylo čerpadlo schopné dodat. Při všech měřeních byl vidět výrazný propad generovaného proudu při niž-

ším průtoku. Povedlo se také prokázat závislost generovaného proudu na vodivosti pracovní látky. Důkazem pro tento fakt je především vyhodnocení měření s různými koncentracemi roztoku NaCl (viz Obr. 2.11) a dále pak také vyhodnocení všech měřených veličin (viz Obr. 2.13). Jediným nejasným výsledkem bylo měření s roztokem skalice modré, při kterém byl generován vyšší proud než bylo očekáváno vzhledem k vodivosti. Bylo by tedy vhodné měření zopakovat po zavedení popsanych optimalizací. Látkou s největší vodivostí byl roztok kyseliny chlorovodíkové, který také vykazoval největší generovaný proud překonávající 4 mA.

Celkově lze dosažené výsledky považovat za velmi přesvědčivé a lze konstatovat, že očekávání a zadání práce bylo splněno. Nyní se otevírá prostor pro další výzkum, při kterém by mohla být učiněna řada optimalizací týkající se samotné konstrukce i měření parametrů, tak jak je popsáno výše (viz kapitola 2.4). Poté by bylo možné dosáhnout větší účinnosti generátoru s možností přesnějšího měření jeho parametrů.

LITERATURA

- [1] LIPSCOMBE, Giles, Jordan PENNEY, Roger LEYSER a Hayley Jane ALLISON. Water Under the Bridge. *Physics Special Topics* [online]. 2014 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://physics.le.ac.uk/journals/index.php/pst/article/view/743/517>
- [2] BEDNÁŘ, V a J ŠLEIS. Magnetohydrodynamický generátor a jeho účinnost. In: *Fyzikální seminář FJFI ČVUT* [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Leto10/proc/mhd.pdf>
- [3] TAKEDA, M., Y. OKUJI, T. AKAZAWA, Liu XIAOJUN a T. KIYOSHI. Numerical analysis on a helical-channel seawater MHD generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2005, **15**(2), 4 [cit. 2017-05-29]. ISSN 1051-8223. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1440093/>
- [4] CELIŃSKI, Zdzisław. *Nové zdroje elektrické energie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. ISBN 04-540-85.
- [5] BALÁK, Rudolf. *Nové zdroje energie*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Polytechnická knižnice (SNTL).
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 11.díl - elektromagnetická. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-11dil-elektromagneticka>
- [7] TAKEZAWA, Setsuo. Operation of the Thruster for Superconducting Electromagnetohydrodynamic Propulsion Ship "YAMATO 1". *Bulletin of the M.E.S.J* [online]. 1995 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://www.jime.jp/e/publication/bulletin/english/pdf/mv23n011995p46.pdf>
- [8] Yamato -1 Magnetohydrodynamic ship. In: *AR15.COM* [online]. 2012 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: http://www.ar15.com/forums-/t_1_5/1394045_Yamato_1_Magnetohydrodynamic_ship.html
- [9] STROHL, G. Ralph a William D. JACKSON. Magnetohydrodynamic power generator. In: *Encyclopedie Britannica* [online]. 2007 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/magnetohydrodynamic-power-generator>
- [10] BANERJEE, S. Lecture - 38 Magnetohydrodynamic Power Generation. In: *Youtube* [online]. 2008 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=mE3uY_yKsCo

- [11] VEIS, Štefan. *Magnetohydrodynamické generátory*. Bratislava: Alfa, 1980. Edícia matematicko-fyzikálnej literatúry.
- [12] KAYUKAWA, Naoyuki. Open-cycle magnetohydrodynamic electrical power generation: a review and future perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2004, **30**(1), 28 [cit. 2017-01-14]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0360128503000637/1-s2.0-S0360128503000637-main.pdf?_tid=113925f6-da9f-11e6-8f32-00000aab0f6b&acdnat=1484428920_c95be87683f71e4e8cb5a0f682d3e073
- [13] OKUNO, Yoshihiro. <http://www.mech.titech.ac.jp/tse/pdf/090325-meeting/Okuno.pdf>. In: emph Dept. of Mechanical Engineering and Science, Tokyo Institute of Technology [online]. [cit. 2017-01-16]. Dostupné z: <http://www.mech.titech.ac.jp/tse/pdf/090325-meeting/Okuno.pdf>
- [14] NCE EI Calpeda oběhové čerpadlo. In: emphCalpeda [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.calpeda.cz/cz/nce-ei-calpeda-obehove-cerpadlo>
- [15] ŠERÝ, Martin. *Vlastnosti permanentních magnetů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [16] VŠETIČKA, Martin a Jaroslav REICHL. Voltampérová charakteristika elektrolytického vodiče, galvanické články. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/280-voltamperova-charakteristika-elektrolytickeho-vodice-galvanicke-clanky>
- [17] *Vedení elektrického proudu v kapalinách a plynech* [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: http://www.gymsusice.cz/images_users/predmety/fyzika/f_texty-vedeni_proudu_v_kapalinach.pdf
- [18] Electrical Conductivity of Aqueous Solutions. In: *Colorado State University* [online]. [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: http://sites.chem.colostate.edu/diverdi/all_courses/CRC%20reference%20data/electrical%20conductivity%20of%20aqueous%20solutions.pdf
- [19] KONESHAN, S., Jayendran RASAI AH a R. M. LYNDEN-BELL. Solvent Structure, Dynamics, and Ion Mobility in Aqueous Solutions at 25 °C. *The Journal of Physical Chemistry B* [online]. 1998, **102**(21), 12 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jp980642x>
- [20] Měření průtoku a proteklého množství. *Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha* [online]. 2005 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k453>

- [21] LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ A REYNOLDSOVO ČÍSLO. *iPotrubí.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/1.-laminarni-proudeni-a-reynoldsovo-cislo.html>
- [22] TLAKOVÁ ZTRÁTA V TRUBCE. *iPotrubí.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/2.-tlakova-ztrata-v-trubce.html>
- [23] KRŠIAK, O. *Optimalizace modelu vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Radil, Ph.D..
- [24] Fyzikální údaje neodymových magnetů. *Unimagnet* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/obsah/12-fyzikalni-udaje-neodymovych-magnetu>
- [25] Conductance Data For Commonly Used Chemicals. In: *Emerson* [online]. 2010 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.emerson.com/documents/automation/68896.pdf>
- [26] LIDE, David R., ed. *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data* [online]. 84th ed. Boca Raton [u.a.]: CRC Press, 2003 [cit. 2017-05-27]. ISBN 08-493-0484-9. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=q2qJId5TKOkC&pg=SA8-PA76&lpg=SA8-PA76&dq=CONCENTRATIVE+PROPERTIES+OF+AQUEOUS+SOLUTIONS:+DENSITY,+REFRACTIVE+INDEX,+FREEZING+POINT+DEPRESSION,+AND+VISCOSITY&source=bl&ots=9Vd0-NqgJh&sig=6xSAXtLNPqauMt9OAIVAZDYZMu0&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwigkZb-oJDUAhVBPhQKHb5UB8cQ6AEIYZAJ#v=onepage&q&f=false>
- [27] NOVÁK, Josef a kol. *Fyzikální chemie: bakalářský a magisterský kurz* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCH4Mgr.pdf>
- [28] HAVLÍKOVÁ, Marie a Soňa ŠEDIVÁ. *Měření v elektrotechnice: Laboratorní cvičení* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=56609>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	magnetická indukce (T)
v	rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v_x	rychlost ve směru x ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v_y	rychlost ve směru y ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
F	síla (N)
Q	elektrický náboj (C)
F_{do}	dostředivá síla (N)
m	hmotnost (kg)
r	poloměr kružnice (m)
λ	střední volná dráha elektronu (m)
τ	střední doba mezi srážkami (s)
ω	uhlová rychlost ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
v_0	obvodová rychlost po kružnici ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
β	Hallův činitel (-)
E_y	intenzita elektrického pole ve směru y ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)
E_y^*	výsledná intenzita elektrického pole ve směru y ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)
E_x^*	výsledná intenzita elektrického pole ve směru x ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)
K	činitel zatížení (-)
μ	pohyblivost elektronů ($\text{m}^2\cdot\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
J	proudová hustota ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)
J_x	proudové hustota ve směru x ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)
J_y	proudové hustoty ve směru y ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)
σ	konduktivita látky ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
p_m	měrný příkon ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
η_e	elektrická účinnost (-)
R	elektrický odpor (ω)
ρ_R	měrná rezistivita (Ωm)
l	vzdálenost (m)
S	plocha (m^2)
γ	měrná konduktivita elektrolytu ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
Q	průtok kapaliny ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
ρ_T	hustota tělíska ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
m_T	hmotnost tělíska (kg)
V_T	objem tělíska (m^3)
Δp	tlakové ztráty (Pa)
Δh	výška vodního sloupce (m)
ρ	hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

g	tíhové zrychlení ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Re	Reynoldsovo číslo (-)
d	průměr potrubí (m)
ν	kinematická viskozita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
ζ	ztrátový součinitel (-)
λ	součinitel tření (-)
d_{ekv}	ekvivalentní průměr (m)
o	obvod (m)
B_r	remanentní indukce (T)
H_c	koercitivní síla ($\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$)
B_{hmax}	maximální energetický součin ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
w	hmotnostní zlomek (%)
U	napětí (V)
Δ_U	absolutní chyba při měření napětí (V)
I	elektrický proud (A)
Δ_I	absolutní chyba při měření proudu (A)
Q_{max}	maximální průtok kapaliny ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{min}	minimální průtok kapaliny ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_1/Q_2	korekční součinitel průtoku (-)
Q'_{max}	maximální průtok kapaliny s korekcí ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q'_{min}	minimální průtok kapaliny s korekcí ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
U_t	teoretická hodnota napětí (V)
U_{t0}	parazitní napětí (V)
Δ_U	generované napětí (V)
I_{k0}	parazitní zkratový proud (A)
I_{km}	maximální zkratový proud (A)
U'_0	generované napětí na prázdko (V)
I'_{k0}	generovaný zkratový proud (V)
Δ_{DP}	absolutní chyba u digitálního přístroje
δ_M	mezní chyba z měřené hodnoty
δ_R	chyba z největší hodnoty měřicího rozsahu
X_M	měřená hodnota
X_R	měřicí rozsah

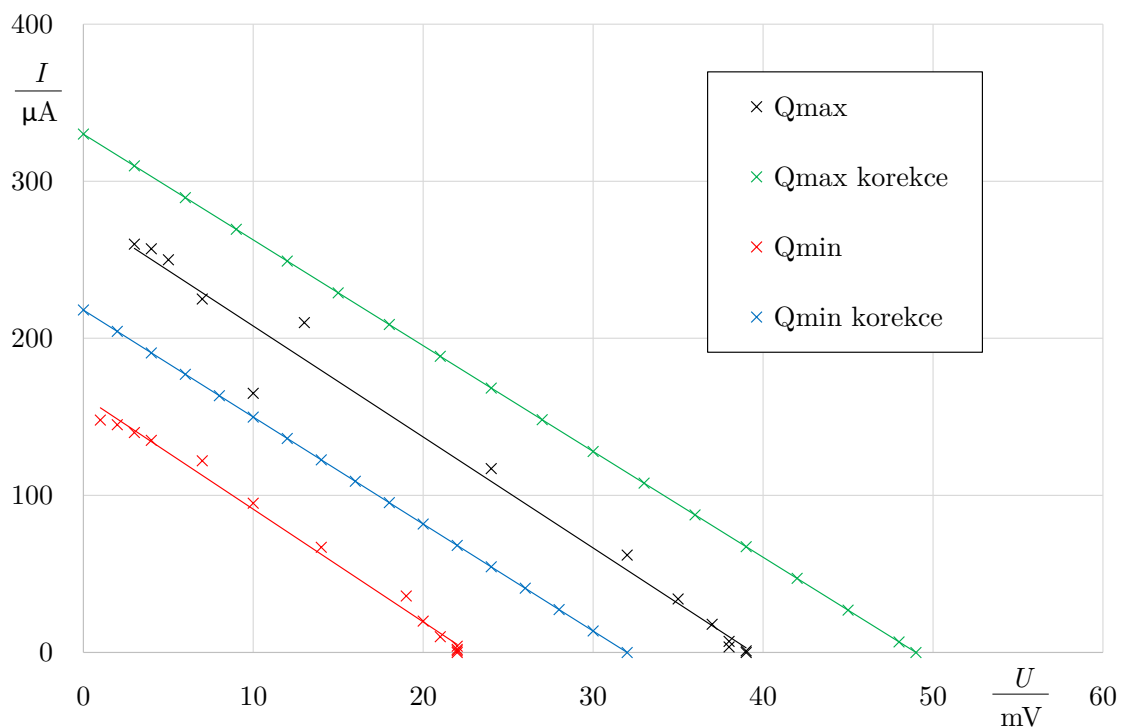
SEZNAM PŘÍLOH

A Grafické zpracování měření	58
A.1 Měření s uhličitanem draselným	58
A.2 Měření s chloridem sodným	61
A.3 Měření s modrou skalicí	64
A.4 Měření s hydroxidem draselným	65
A.5 Porovnání měřených roztoků	66

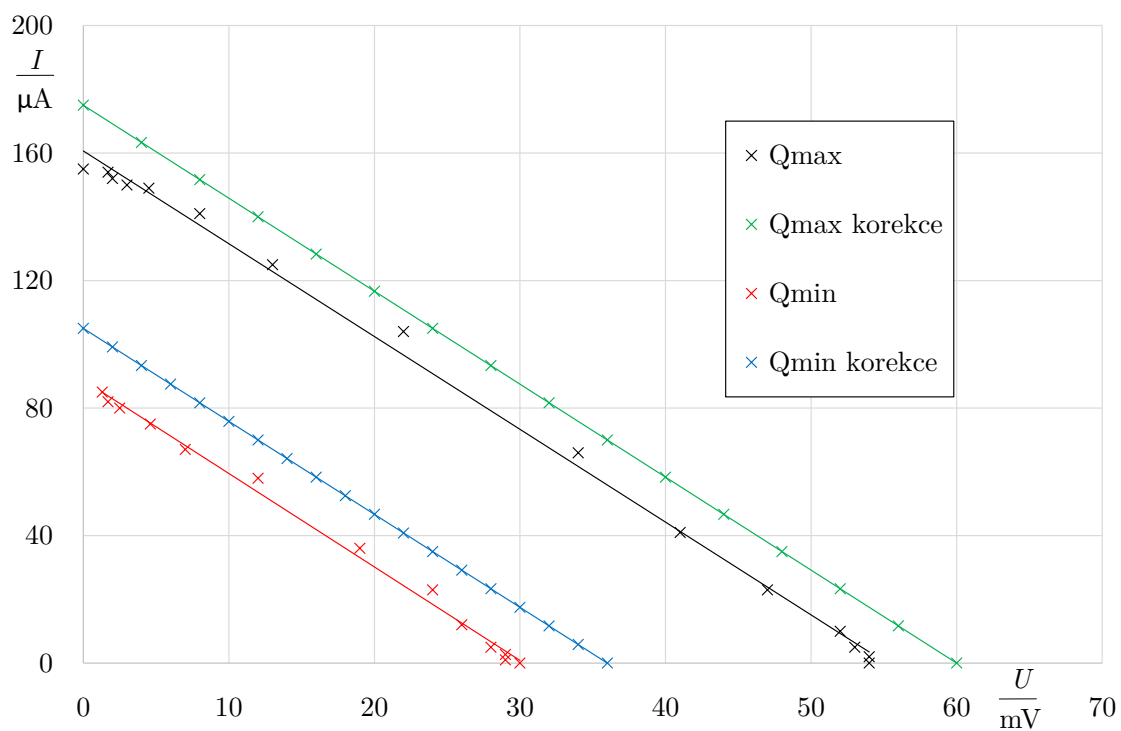
A GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

A.1 Měření s uhličitanem draselným

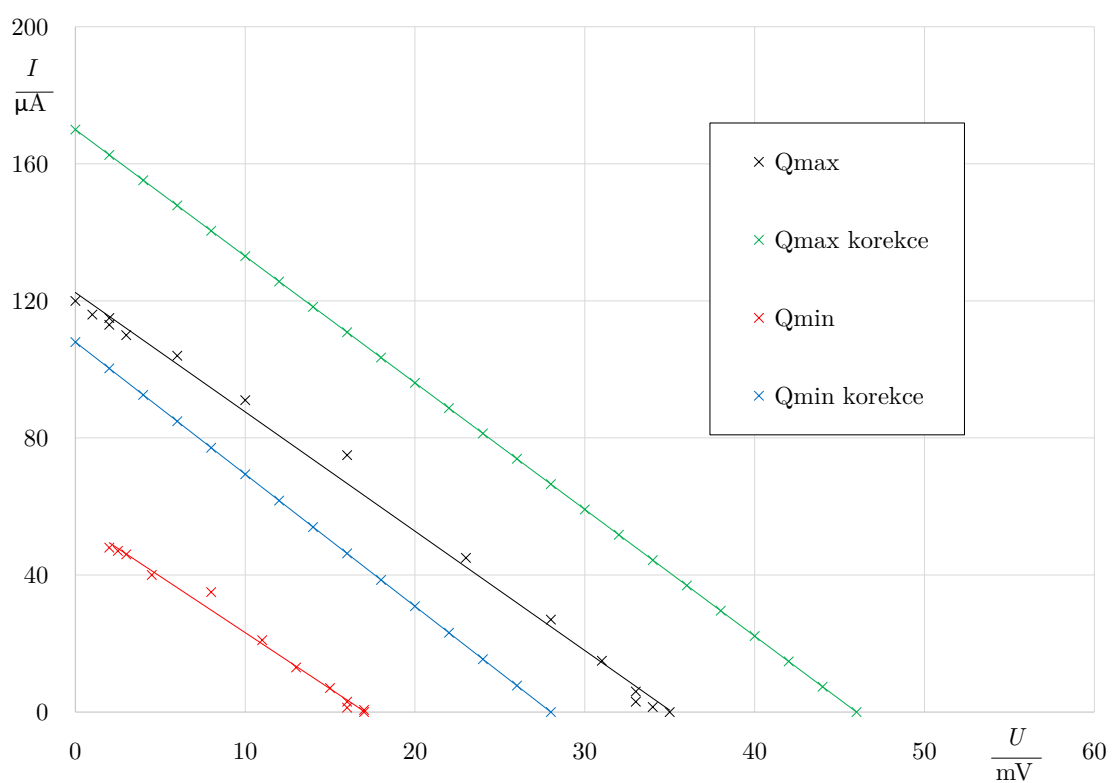
V této kapitole jsou pro úplnost uvedena všechna grafická vyhodnocení pro měření s uhličitanem draselným, která nejsou uvedena v experimentální části práce.



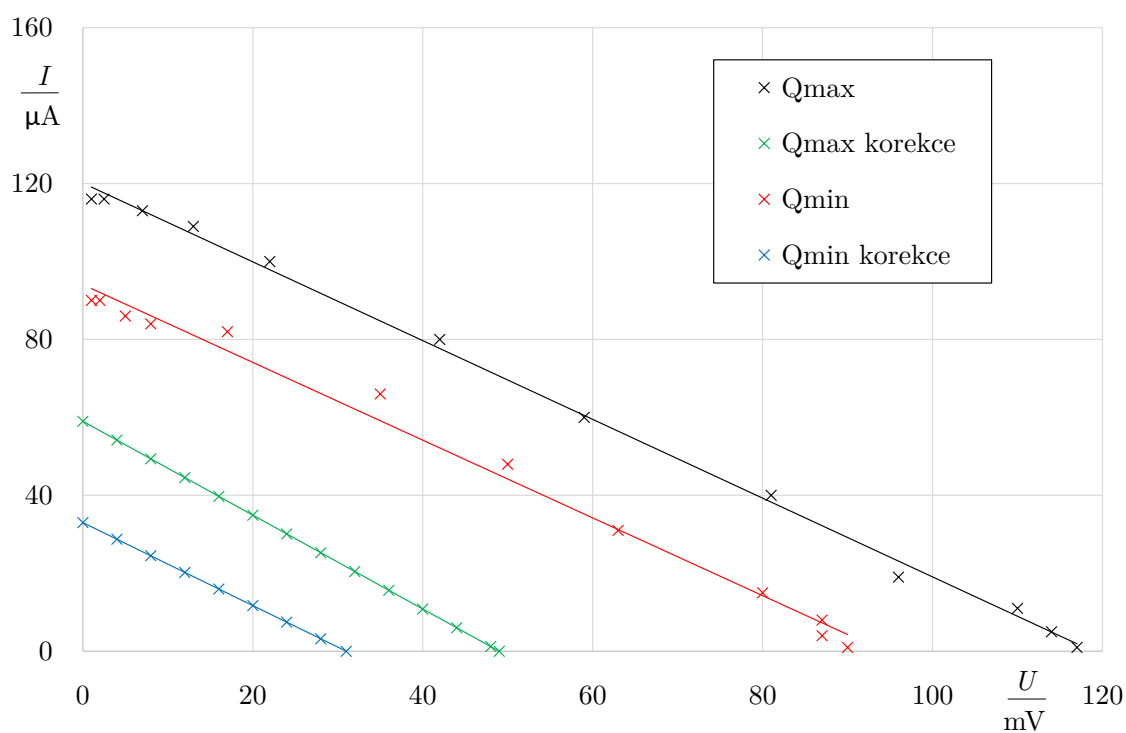
Obr. A.1: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C+M



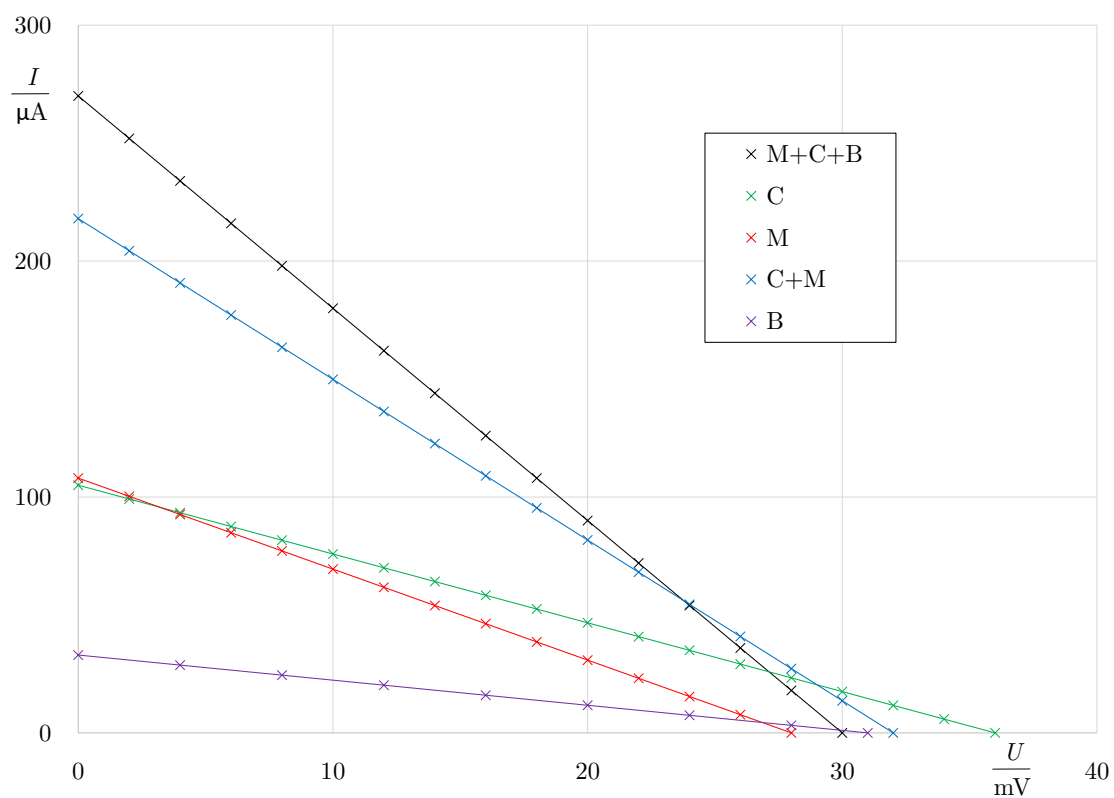
Obr. A.2: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, C



Obr. A.3: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, M



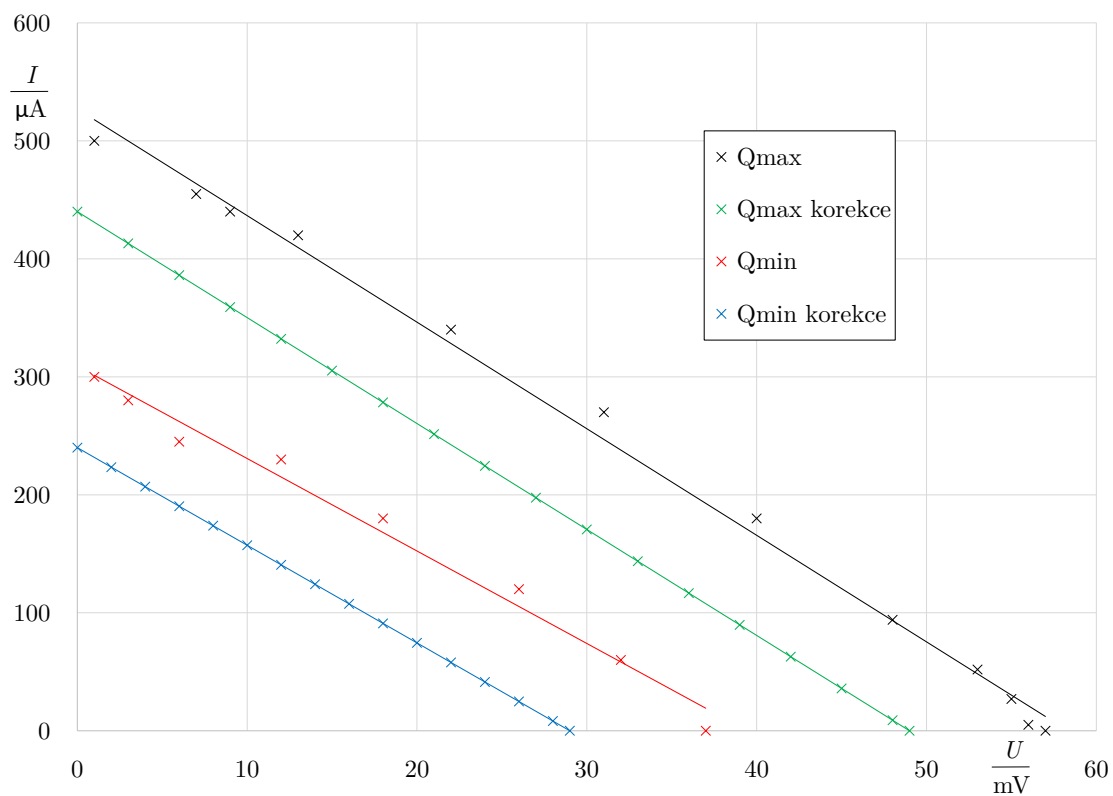
Obr. A.4: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, B



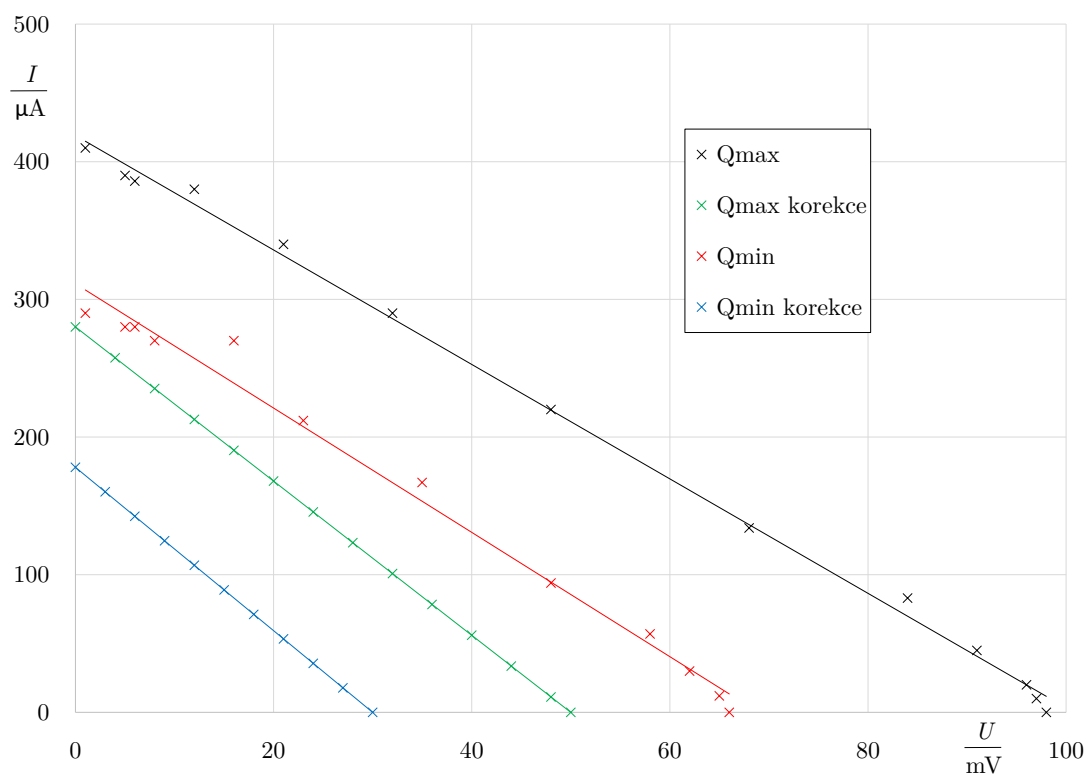
Obr. A.5: VA charakteristika, K_2CO_3 , 25 %, porovnání různých zapojení elektrod při minimálním průtoku

A.2 Měření s chloridem sodným

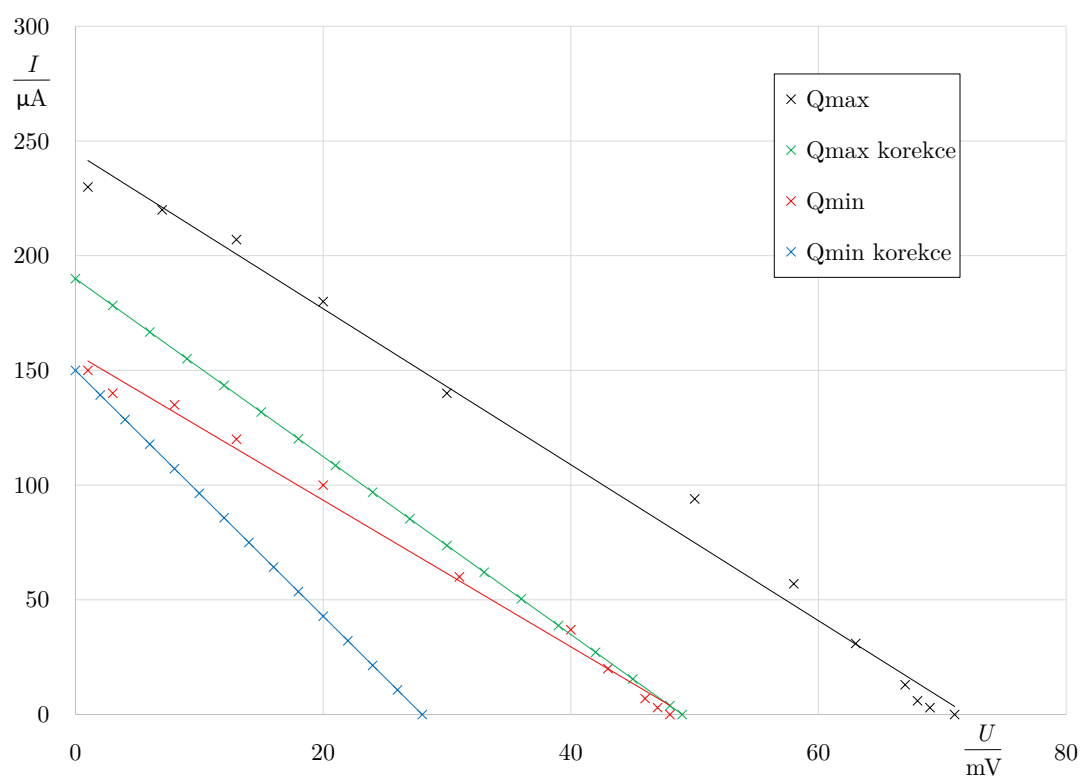
Obdobně jsou uvedena všechna grafická vyhodnocení pro měření s chloridem sodným, která nejsou uvedena v experimentální části práce.



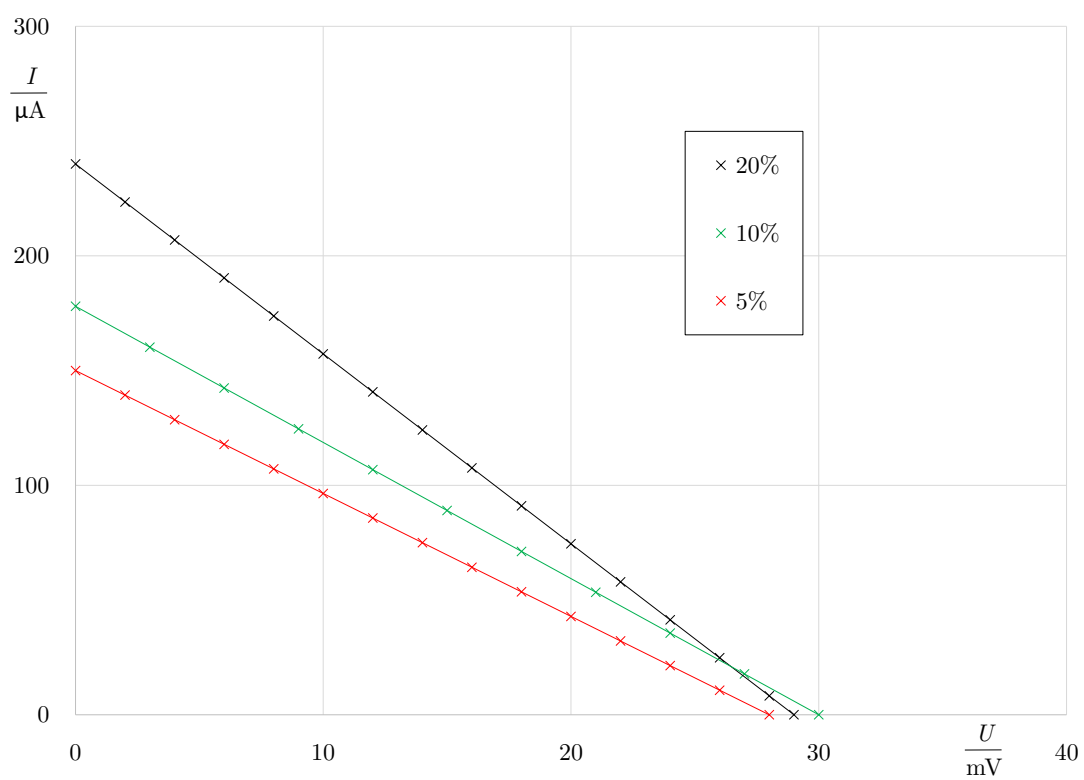
Obr. A.6: VA charakteristika, NaCl, 20 %, C+B+M



Obr. A.7: VA charakteristika, NaCl, 10 %, C+B+M



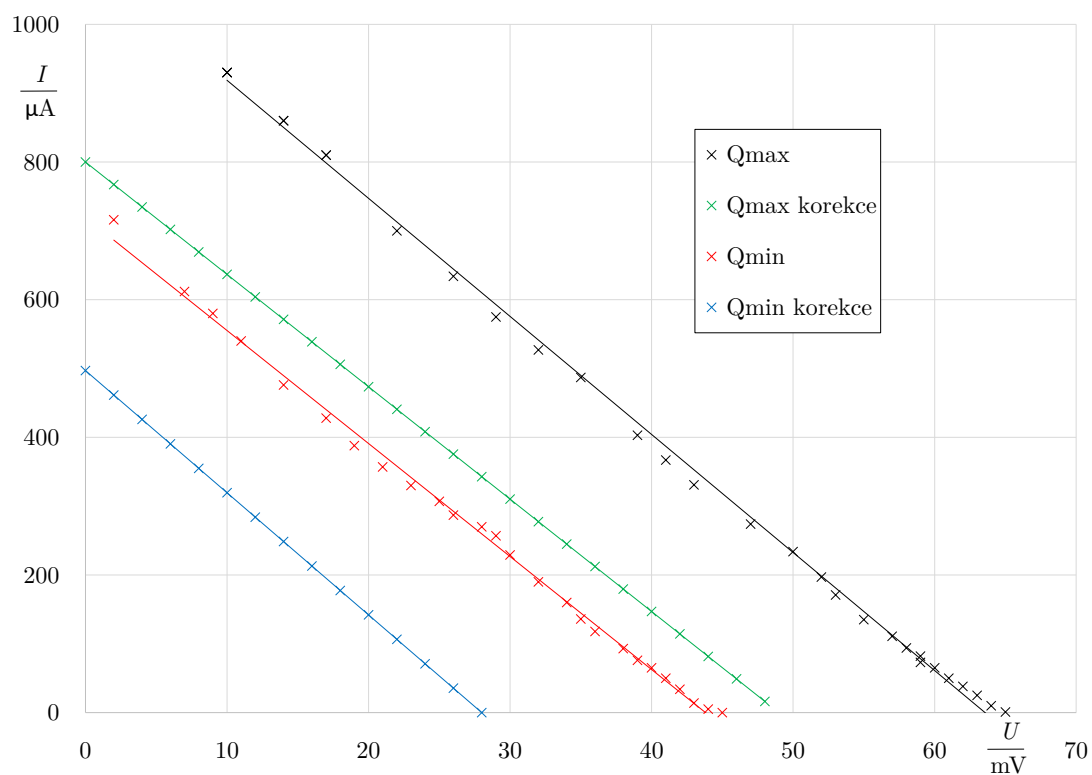
Obr. A.8: VA charakteristika, NaCl, 5 %, C+B+M



Obr. A.9: VA charakteristika, NaCl, C+B+M, porovnání různých koncentrací při minimálním průtoku

A.3 Měření s modrou skalicí

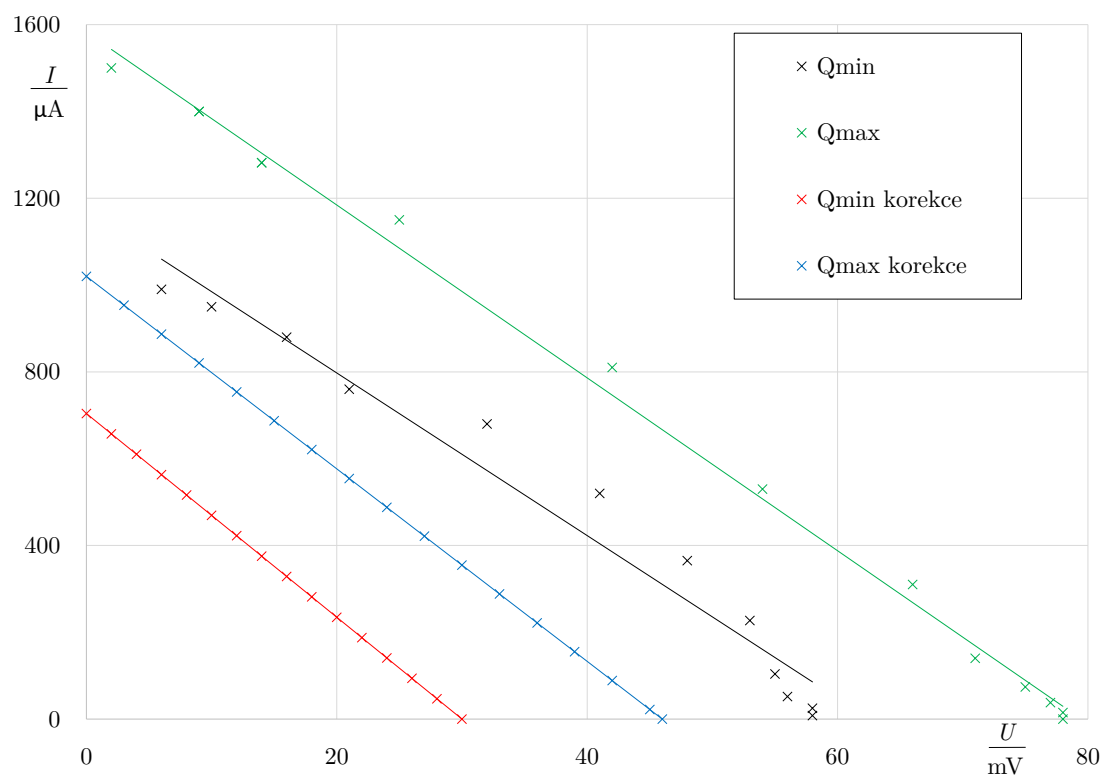
Grafické zpracování měření s modrou skalicí.



Obr. A.10: VA charakteristika, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 17,5 %, C+B+M,

A.4 Měření s hydroxidem draselným

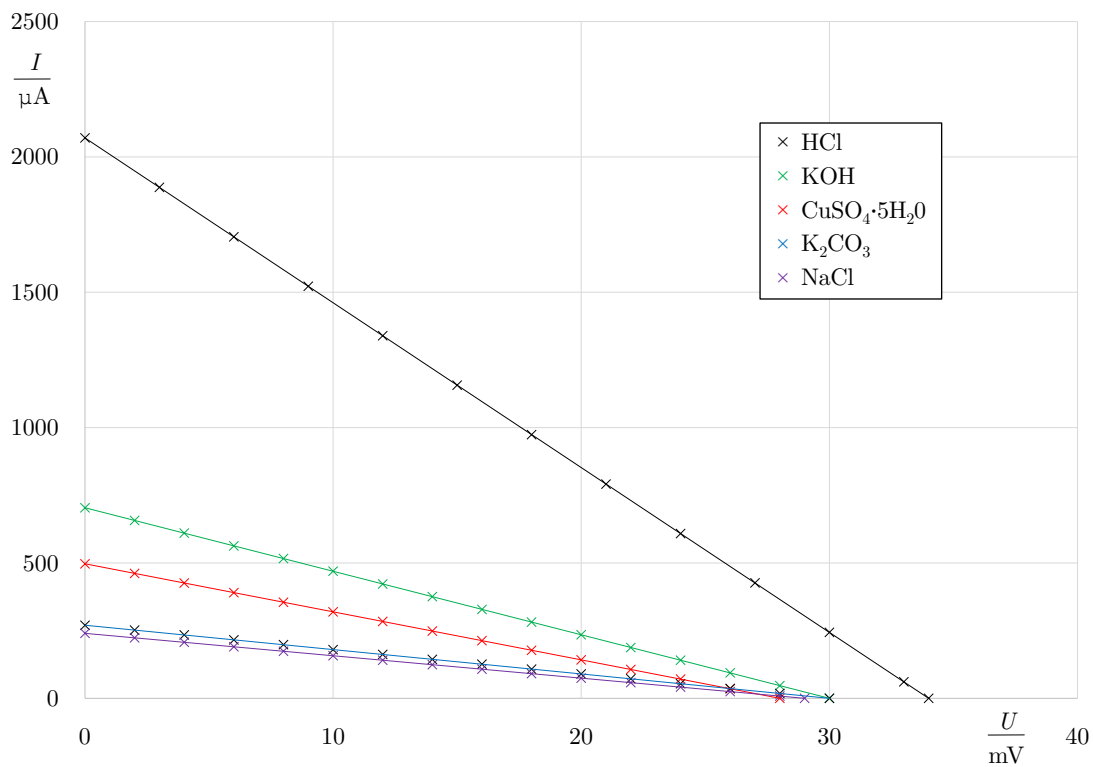
Grafické zpracování měření s hydroxidem draselným.



Obr. A.11: VA charakteristika, KOH, 18 %, C+B+M,

A.5 Porovnání měřených roztoků

Posledním uvedeným grafickým zpracováním je porovnání všech měřených roztoků při minimální průtoku.



Obr. A.12: VA charakteristika, porovnání všech měřených roztoků (koncentrace NaCl 20 %), C+B+M, Q_{min}